



L A S C I E N C E D E S M A T É R I A U X A U C A R R E F O U R D E S S C I E N C E S

Une voiture moins gourmande en carburant, et il faut trouver des matériaux plus légers. Un ordinateur plus performant, et c'est sur leur miniaturisation qu'il faut se pencher. Des produits répondant au développement durable, et il convient d'étudier leur capacité à être recyclés...

Chaque progrès de la civilisation pose de nouvelles questions sur les matériaux, avec notamment la nécessité de disposer d'outils de caractérisation, de modélisation et de simulation numérique de plus en plus fins. Grenoble est à la pointe de cette science qui impose un dialogue entre physiciens, chimistes et ingénieurs.

Science unique, compétences multiples

P. 24

Comment procéder ?

P. 31

Grands instruments : une boîte à outils pour caractériser les matériaux

P. 26

Vie, mort et résurrection des matériaux

P. 32

À chaque échelle sa simulation

P. 28

Les défis de la miniaturisation

P. 34

La chimie des solides : au cœur des matériaux fonctionnels

P. 29

L'IFR "Science et technologie des matériaux" : un regard vers l'avenir

P. 36

Le plein d'énergie

P. 30

Formations : demandez le programme !

P. 38

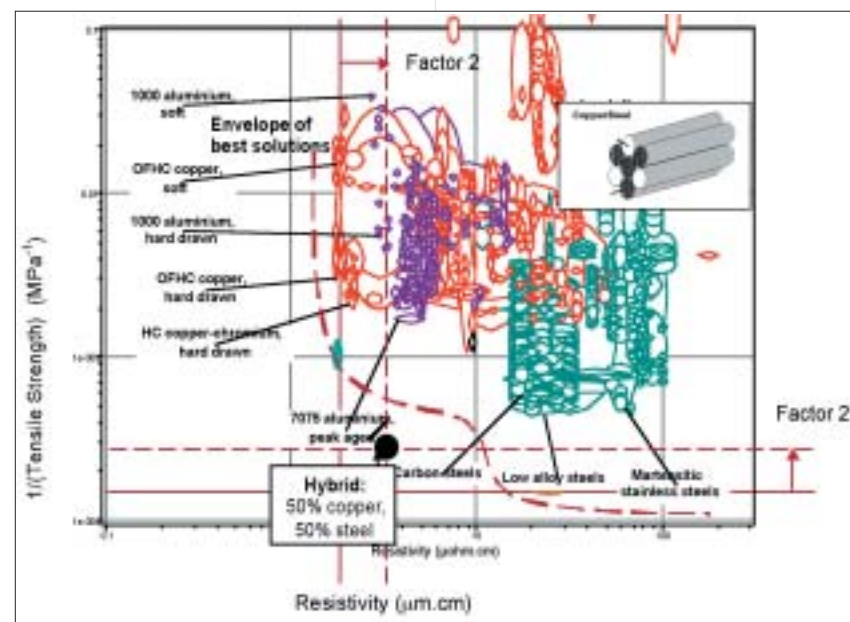
MATÉRIAUX : science unique, compétences multiples

Comprendre, élaborer, optimiser des matériaux de plus en plus complexes. Pour répondre aux besoins de l'industrie, physiciens, chimistes et mécaniciens doivent unir leurs efforts autour de la science des matériaux.

C'est une discipline ancienne et nouvelle tout à la fois. Ancienne, car son acte fondateur peut être trouvé dans le dialogue de Galilée (1564-1642) sur les *Deux sciences nouvelles* et le traité *De re metallica* du minéralogiste allemand Georg Bauer Agricola (1494-1555). Nouvelle, parce que les principaux concepts et outils expérimentaux ont été développés au cours de la seconde moitié du XX^e siècle. La science des matériaux se définit comme l'étude des relations entre la microstructure des matériaux, leurs propriétés, et les procédés d'élaboration et de transformation. Par microstructure, on entend la façon dont les atomes sont arrangés dans l'espace, à toutes les échelles. Les propriétés recensent les caractéristiques (mécanique, électriques...) qui rendent le matériau intéressant. Enfin, les procédés définissent des paramètres de transformation des matériaux (températures, conditions de déformation...) et leurs conséquences sur les microstructures.

Une science de l'ingénieur par vocation même

Qu'est-ce qu'un matériau, sinon la matière mise en état de remplir une fonction ? En ce sens, cette discipline appartient, par sa vocation même, aux sciences de l'ingénieur, qui s'appuient sur la physique, la chimie et la mécanique. Irréductible à aucune de ces disciplines, elle est parente de toutes. Son lot quotidien : comprendre, élaborer, optimiser des matériaux de plus en plus complexes exigés par les besoins d'une civilisation industrielle toujours plus sophistiquée. La variété de la science des matériaux



La conception d'un câble électrique comme matériau hybride : combiner une bonne conductivité électrique et une bonne résistance mécanique.

résulte d'abord de celle de son objet d'étude. Les matériaux créés par l'être humain appartiennent à trois grandes classes, correspondant chacune à la nature de la liaison chimique : les métaux, les polymères et les céramiques. À partir de ces trois grandes classes, on peut construire des matériaux intermédiaires, composites, hybrides... Fonction des matériaux : transmettre des forces (on parle alors de matériaux de structure), de l'énergie ou de l'information (on les appelle alors matériaux fonctionnels). Ces distinctions tendent à s'estomper : les matériaux de structure deviennent de plus en plus multifonctionnels, et les matériaux fonctionnels doivent conserver une tenue structurale. L'INP Grenoble dispose en son sein des compétences solides dans les deux catégories qui pourraient lui donner une compétence unique dans le domaine des microsystèmes : un atout majeur.

Un exercice de changement d'échelle

Deux concepts clés sont à la base de la compréhension des matériaux : la structure atomique (chimique, cristallographique) et le comportement des défauts. Les propriétés macroscopiques peuvent dépendre de façon déterminante des défauts du matériau, de son écart par rapport au solide cristallin, idéal du physicien. D'une petite perturbation dans le comportement du matériau, le défaut (dislocation, joint de grain, lacunes...) devient l'acteur principal qui domine le comportement. Une idée centrale consiste à considérer la microstructure – ce qui se passe entre l'échelle atomique et le millimètre – comme un passage obligé pour comprendre les relations entre deux observables macroscopiques : les paramètres du procédé (température, déformation, etc.) et les propriétés du matériau (limite d'élastici-

té, conductivité, aimantation, etc.). La démarche de la science des matériaux peut en fait se synthétiser comme un exercice de "changement d'échelle" intégrant le comportement, individuel ou collectif, des défauts.

De la description à la prédiction

La science des matériaux s'est d'abord intéressée à comprendre les matériaux existants (et leurs variations). Depuis une dizaine d'années, une approche comparative s'est développée, pour choisir des matériaux. La tendance actuelle vise à concevoir des matériaux "sur mesure" répondant à un cahier des charges. Cette dernière démarche rapproche la science des matériaux des sciences de la vie, via le concept de "biomimétisme" : s'inspirer des solutions naturelles pour concevoir des matériaux et des structures performants. La science des matériaux a donc connu une double évolution : de descriptive, elle est devenue prédictive ; d'une réflexion sur la matière, elle porte désormais sur un système. Cette évolution s'est traduite par le développement d'outils de caractérisation de pointe. Grenoble a joué et joue encore

dans ce domaine un rôle pionnier. Les méthodes de caractérisation de plus en plus fines utilisées dans les laboratoires s'associent à l'utilisation des grands instruments (réacteurs de l'ILL, rayonnement synchrotron) pour nous mener toujours plus avant dans la connaissance de la microstructure. Elle s'est aussi traduite par un rôle croissant de la modélisation et de la simulation numérique pour comprendre les matériaux. Le développement de matériaux fonctionnels de plus en plus performants – pour la microélectronique ou le stockage de l'énergie – requiert l'utilisation de la créativité de la chimie des solides. Mais il ne suffit pas de concevoir des matériaux performants, il faut aussi les élaborer et assurer leur performance sur la durée : ces deux exigences spécifiques de la science des matériaux sont source de questions scientifiques nouvelles.

Sur mesure, miniaturisé, allégé et durable

Partout où vous porterez votre regard, vous trouverez des matériaux. À chaque nouvelle exigence de la société industrielle, les matériaux devront répondre. La recherche de la performance accrue des

nouveaux ordinateurs ? La miniaturisation des structures pose des problèmes nouveaux d'élaboration, de stabilité, de durabilité dans le temps de fonctionnement, de résistance à l'endommagement. La recherche de moteurs d'avion plus efficaces et moins bruyants ? Les exigences de températures de fonctionnement accrues sont un véritable défi lancé aux ingénieurs matériaux. Le développement durable ? C'est dans l'allègement des structures, dans leur durabilité, donc dans le choix optimal des matériaux et des procédés, tout autant que dans le recyclage (encore un problème matériau) que se trouve la clé.

Le XXI^e siècle sera celui des matériaux sur mesure, miniaturisés, allégés et durables. Personne ne détient seul une réponse complète à toutes les questions posées. Physiciens, chimistes, mécaniciens doivent unir leurs efforts, car pour être unique la science des matériaux n'en cultive pas moins la diversité des compétences. En son sein, l'INP Grenoble dispose de cette diversité indispensable pour relever les défis. Reste à les fédérer efficacement aussi bien au niveau de la formation que de la recherche. **Yves Bréchet, Professeur à l'INP Grenoble**

Prix des Ingénieurs de l'année

Au-delà du diplôme et d'un métier, les ingénieurs aujourd'hui, c'est aussi et d'abord un engagement dans la vie. C'est dans un projet matériel, qui intègre le quotidien du plus grand nombre, et respecte notre environnement, s'engager dans une carrière et remettre en cause l'existant pour en repenser les limites. C'est d'avoir dans ses valeurs, approfondi la réflexion, pour que la génération future perpétue l'héritage. Un ingénieur aujourd'hui est un défi qui mêle science et responsabilité.

C'est pourquoi l'Union Nationale des Ingénieurs et Techniciens, associée au CNRS, a créé le « Prix des Ingénieurs de l'année », destiné à mieux faire connaître la profession d'ingénieur et récompenser chaque année les meilleurs d'entre eux.

Ingénieur d'une vie meilleure

Logos des partenaires : STERIS, ANDRA, arcelor, ABB, LAPARUS.

GRANDS INSTRUMENTS : une boîte à outils pour caractériser les matériaux

Les synchrotrons de 3^e génération comme l'instrument européen présent à Grenoble (ESRF) n'en finissent pas de révolutionner les connaissances sur la structure des matériaux. De la caractérisation 3D non destructive à la quantification d'objets nanométriques, ces instruments sont devenus des outils indispensables en science des matériaux. Exemples d'application.

1. Optimiser les solutions d'assemblage dans l'aéronautique

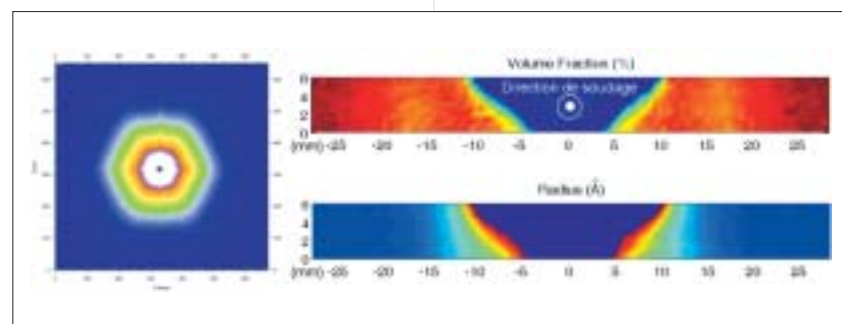
Toujours plus légères. Tel est le défi auquel sont soumises les structures en alliages d'aluminium utilisées dans l'aéronautique. Parmi les voies prometteuses : les solutions modernes de soudage (par laser, à l'état solide FSW, Friction Stir Welding).

Mais tout procédé de soudage nécessite un apport de chaleur qui provoque des modifications de la microstructure, et donc des propriétés mécaniques associées. Ainsi, les alliages utilisés en aéronautique tiennent l'essentiel de leurs propriétés mécaniques de précipités intermétalliques (comme Al_2Cu ou $MgZn_2$) de dimensions nanométriques (leur diamètre optimal est de l'ordre de 5 à 6 nanomètres). Sous l'effet de la chaleur, ces précipités peuvent se dissoudre ou grossir au-delà de leur taille optima-

le, d'où une baisse des caractéristiques mécaniques dans la zone affectée thermiquement – ZAT pour les intimes – d'un assemblage soudé.

La diffusion des rayons X (Small Angle X-ray Scattering ou SAXS) permet de caractériser quantitativement l'état de précipitation avec une résolution spatiale correspondant à la taille du faisceau de rayons X (couramment 200 μm par 200 μm). En effet, les précipités présents dans le matériau diffusent les photons X de manière similaire à celle des gouttes d'eau dispersées dans un nuage diffusant la lumière visible du soleil. L'analyse du spectre de diffusion des rayons X permet de remonter à la taille moyenne et à la fraction volumique des objets présents dans le matériau.

> Laboratoire LTPCM : F. Bley, A. Deschamps, F. Livet, J.-P. Simon



Cartographie d'états de précipitation dans une soudure d'aluminium

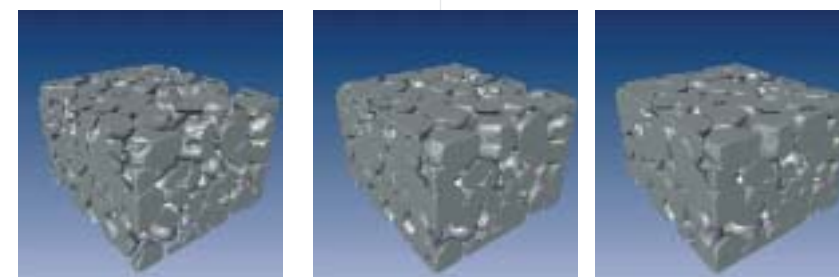
(a) spectre de diffusion des RX d'un alliage d'aluminium contenant des précipités de taille 5 nm ; (b) cartographies dans le plan normal à la direction de soudage des états de précipitation réalisés à partir de spectres de SAXS : on peut observer la dissolution des précipités au niveau de la soudure, et une zone contenant des précipités dont la taille est 10 fois la taille initiale.

2. Caractériser en 3D des matériaux à haute résolution

La tomographie des rayons X permet d'obtenir des images 3D des matériaux et ce, de manière non destructive. Comment ? En prenant un millier de radiographies de l'échantillon qui tourne de 0 à 180°. Autant de clichés qui permettent de reconstruire très rapidement une image en 3D du matériau, avec une résolution de 0,5 μm . Avec cette technique, on peut monter des dispositifs (four, machine de traction/compression, ...) pour réaliser des essais *in situ* sur les matériaux avec, à la clé, de nombreuses applications.

Ainsi, lors d'une mise en forme à l'état semi-solide ou lors de la solidification, les alliages d'aluminium passent par un état semi-solide (mélange de phase solide et liquide). Au cours d'un maintien en température, la structure évolue. Il est possible de suivre cette évolution en 3D par microtomographie haute résolution (2 μm) sur des alliages AlCu et sur des alliages AlSi. Plus récemment, et grâce au développement de la microtomographie rapide, des expériences ont été menées en cours de solidification d'un alliage Al-4%Cu *in situ* en 3D.

Autre exemple, en collaboration avec les industriels de l'agro-alimentaire, le laboratoire GPM2 a étudié les relations entre la structure du pain et ses propriétés mécaniques. Selon les paramètres (eau, sel, levure, farine...), la distribution de taille des "bulles" du pain peut être



Caractérisation in situ de la structure de l'aluminium à l'état semi-solide

Évolution de la phase solide lors d'un maintien d'un alliage Al-15%Cu à l'état semi-solide à 559°C. La phase liquide a été rendue transparente. La résolution est 3 μm et la hauteur de l'échantillon fait environ 0,5 mm.

contrôlée et les expériences menées à 10 μm de résolution ont permis de caractériser cette structure en 3D. Par ailleurs, des essais de fermentation "in situ" ont été réalisés pour suivre l'apparition des bulles, leur croissance et leur coalescence, ce qui constitue une première dans le domaine. Dernière illustration, l'observation *in situ* du frittage de poudres métalliques est rendue possible grâce à la micro-tomo-

graphie à haute énergie. Il devient ainsi possible d'observer les effets de défauts comme les pores sur le frittage entre particules au cœur même du matériau. Pour des frittés d'aciers industriels, la morphologie directionnelle du frittage présente des conséquences importantes et ces expériences permettent de mieux cerner les mécanismes qui en sont à l'origine.

> Laboratoire GPM2 : D. Bellet, J.-J. Blandin, D. Bouvard, R. Dendievel, C. Josserond, L. Salvo, M. Suéry.

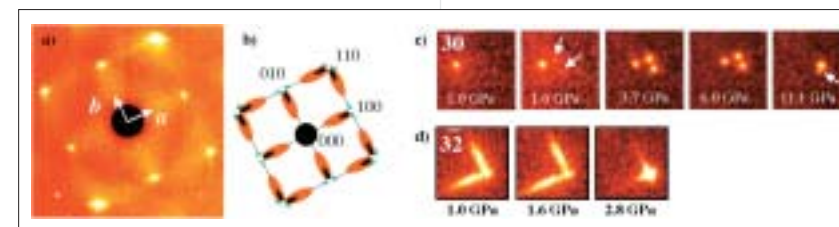
3. Étudier des oxydes nano-structurés

Magnétorésistance ou piézoélectricité colossale, les propriétés remarquables observées dans certains oxydes s'avèrent bien souvent liées au fait que leur structure présente naturellement des inhomogénéités locales à l'échelle nanométrique (1 à 100 nm), caractérisées par une compétition des propriétés chimiques, physiques et structurales.

Nous pouvons imaginer les matériaux possédant une réponse piézoélectrique exceptionnelle comme un cake avec des raisins, ces derniers représentant les inhomogénéités dans une matrice qui les

entoure (appelée structure moyenne). Un des grands défis pour comprendre et améliorer de tels matériaux consiste à observer de manière expérimentale ces inhomogénéités dont on cherche à connaître la taille, la forme, la chimie, la structure cristallographique, etc.

La diffusion du rayonnement synchrotron sous haute pression permet de connaître et de comprendre de tels détails car elle nous renseigne simultanément sur la matrice (la structure moyenne) via la diffusion concentrée sur des points (diffraction de Bragg) mais



Caractérisation de la structure d'un oxyde piezo-électrique sous pression

(a) Spectre de diffusion des RX de $Na_{0.5}Bi_{0.5}TiO_3$ (b) Représentation schématique de la diffusion (c) Évolution en pression d'une tache de Bragg (-> structure moyenne) (d) Évolution en pression de la diffusion diffuse caractéristique de la nano-structure (-> structure locale).

> Laboratoire LMGP : J. Kreisel, F. Hippert. Laboratoire LEPMI : P. Bouvier

L'ESRF : un super microscope

L'ESRF (European Synchrotron Radiation Facility ou Installation Européenne de Rayonnement Synchrotron) est un exemple remarquable de coopération scientifique européenne. Dix-sept nations exploitent ensemble les faisceaux de rayons X extrêmement brillants produits par son anneau de stockage pour étudier une large gamme de matériaux, depuis les biomolécules jusqu'aux nanoaimants, en passant par les cosmétiques de l'Égypte antique et les mousses métalliques. Comparables à des "super microscopes", les sources de rayonnement synchrotron apportent des informations inestimables dans de très nombreux domaines de recherche. Une cinquantaine de synchrotrons dans le monde tentent de répondre aux besoins toujours croissants des scientifiques. Les trois synchrotrons les plus performants au monde sont l'APS (USA), Spring 8 (Japon) et ESRF.

aussi sur la structure locale via la diffusion délocalisée autour des taches de Bragg. Intérêt de la mesure sous pression : faire évoluer cette microstructure pour mieux comprendre pourquoi elle se développe.

Dans le cas concret d'un oxyde nanostructuré, les résultats montrent que les "raisins" se présentent sous forme de plan avec une épaisseur de 1 nm et une extension latérale de 20 nm. La disparition de la diffusion diffuse avec la pression permet d'affirmer que la matrice et les raisins ont bien la même composition chimique mais qu'ils présentent une structure cristallographique différente. Ces pressions peuvent être couramment rencontrées lorsque ces matériaux sont élaborés sous forme de couche mince et les résultats sous pression prédisent qu'elles risquent de faire disparaître des propriétés remarquables.

Alexis Deschamps, professeur à l'ENSEEG
Luc Salvo, maître de conférences à l'ENSPE
Jens Kreisel, chargé de recherches au LMGP à l'ENSPE

À CHAQUE ÉCHELLE SA SIMULATION

Traduire des phénomènes complexes en lois simples : en matière de matériau, les techniques de modélisation existent pour chaque échelle.

Reste à chaîner les différents modèles pour obtenir une simulation complète.

Tout matériau est intrinsèquement hétérogène, ne serait-ce que par sa nature atomique, et il le reste aux échelles supérieures. Ainsi, un métal est un agrégat de grains eux-mêmes constitués de plusieurs phases contenant différents types de défauts tels que dislocations ou lacunes. Comment réduire ce phénomène complexe à des lois simples ? C'est tout l'enjeu de la modélisation. La première démarche généralement employée, dite phénoménologique, consiste à reproduire au mieux les résultats expérimentaux à l'aide d'un nombre réduit de variables, parfois au détriment des origines physiques. Exemple : la loi de Hooke spécifique que dans le régime élastique, la contrainte est proportionnelle à la déformation, indépendamment de la

nature du matériau.

D'autres modélisations s'attachent à remonter à l'origine physique des processus, ce qui nécessite d'intégrer explicitement les hétérogénéités. En réduisant ces dernières à des morphologies et des topologies simples, le modèle peut rester analytique : ce sont les méthodes de champs moyens et d'homogénéisation.

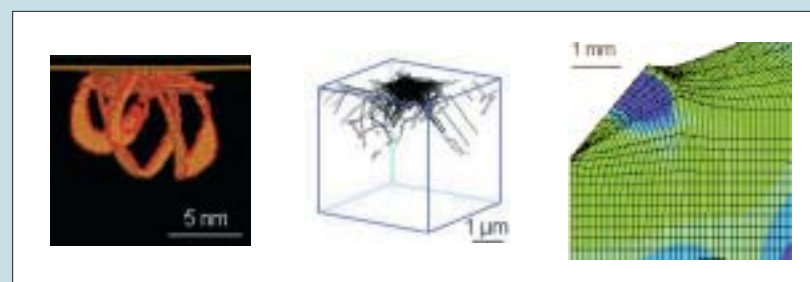
Aujourd'hui, il est possible de tirer profit de la rapidité et de la capacité de stockage des ordinateurs pour décrire précisément les hétérogénéités, à l'aide de modèles dépendant d'un très grand nombre de variables : c'est la simulation numérique. Des techniques spécifiques ont été développées pour chacune des échelles spatiales et temporelles caractéristiques des matériaux.

La science du chaînage

Simulation d'essais de nanoindentation à différentes échelles :

- à l'échelle nanométrique par dynamique moléculaire ;
- à l'échelle micrométrique par dynamique des dislocations ;
- à l'échelle millimétrique par éléments finis.

Ce chaînage est illustré ci-dessous : des énergies calculées par une méthode *ab initio* servent à optimiser un potentiel interatomique qui est utilisé par la dynamique moléculaire. Cette dernière simule la germination des premières dislocations induites par un indenteur. Ces défauts sont introduits sous forme de règles locales dans la dynamique des dislocations qui gère la multiplication et l'interaction des dislocations. Le comportement collectif des dislocations des différents systèmes de glissement définit des relations de comportement qui sont ensuite utilisées dans un code d'éléments finis.



Simulation d'essais de nanoindentation à différentes échelles

(a) à l'échelle nanométrique par dynamique moléculaire (b) à l'échelle micrométrique par dynamique des dislocations (c) à l'échelle millimétrique par éléments finis.

Des techniques spécifiques

À l'échelle de l'angström, les méthodes *ab-initio* déterminent la structure électronique des atomes pour calculer des énergies caractéristiques (de formation de défauts notamment). À l'échelle nanométrique, la dynamique moléculaire simule des processus dépendant de la nature atomique de la matière, tels que ceux se déroulant au cœur des dislocations.

Toujours à l'échelle nanométrique, la méthode de Monte Carlo permet de simuler des processus probabilistes, notamment la précipitation lacunaire.

À l'échelle micrométrique, la dynamique des dislocations simule des ensembles de dislocations en interaction élastique. À cette même échelle, la méthode des éléments discrets simule des milieux granulaires formés de particules en interaction, à partir des lois au contact. Enfin, à l'échelle macroscopique, la méthode des éléments finis vérifie l'équilibre de systèmes décomposés en éléments simples à partir de relations de comportement.

Chaîner les différentes méthodes

Reste à chaîner ces différentes méthodes pour modéliser entièrement un matériau, en tenant compte des processus se déroulant aux différentes échelles (voir encadré). Les informations en sortie d'une simulation sont modélisées de façon phénoménologique et servent de paramètres d'entrée à une simulation à l'échelle supérieure.

La science des matériaux est ainsi un domaine privilégié où les transitions d'échelles prennent toute leur importance.

David Rodney, maître de conférences à l'INP Grenoble, david.rodney@gpm2.inpg.fr

LA CHIMIE DES SOLIDES au cœur des matériaux fonctionnels

Parmi les bases fondamentales de la recherche sur les matériaux, la chimie du solide s'avère indispensable dans les sciences et les techniques modernes. Un constat renforcé par l'avènement des nanosciences.

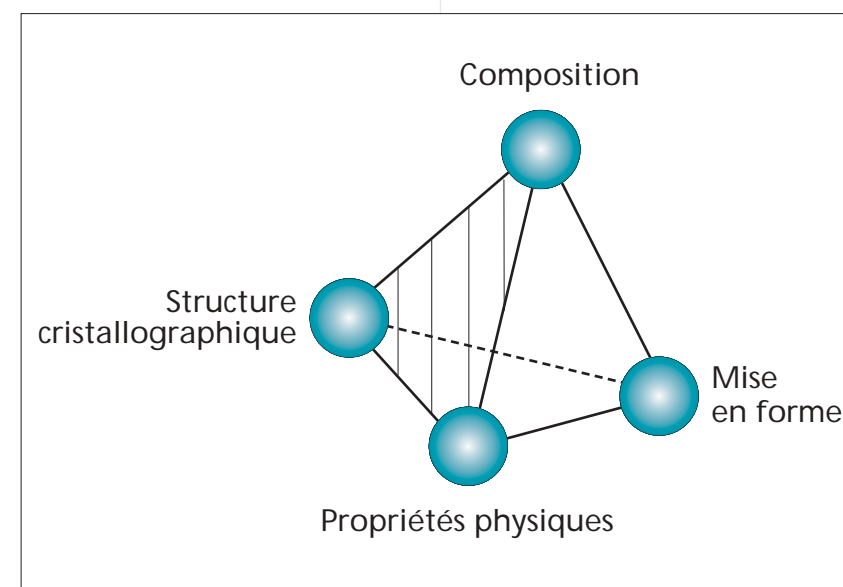
La chimie du solide, et en particulier la cristallographie, s'aborde sous quatre angles : la composition chimique, la structure cristallographique du matériau, ses propriétés – magnétiques, électroniques, optiques – et enfin sa mise en forme. Tous influent sur l'utilisation potentielle d'un matériau donné, même si, en général, la mise en forme finalise l'attribution de la fonction. Une représentation "fonctionnelle" des connexions reliant les différents éléments est obtenue en les distribuant aux sommets d'un tétraèdre où chacun est alors interdépendant des trois autres.

Ainsi, en adaptant la composition en oxygène dans le matériau supraconducteur à haute température Y-Ba-Cu-O, on le rend isolant (YBa₂Cu₃O₆ - quadratique) ou supraconducteur (YBa₂Cu₃O₇ - orthorhombique).

En changeant la structure cristallographique du composé, les propriétés de conduction électrique s'en trouvent fondamentalement modifiées.

Au stade du développement du procédé, la mise en forme du matériau supraconducteur sous forme de films minces (dépôt par voie chimique ou physique) permet ensuite d'obtenir des dispositifs adéquats par exemple pour transporter du courant électrique à haute densité sans perte par échauffement du conducteur. C'est le triangle "composition/structure cristallographique/propriétés physiques" qui constitue ici la base de l'analyse.

Mais il est aussi naturel de montrer que la mise en forme du matériau pour adapter ses propriétés passe par une modulation de sa composition et une



adaptation de la microstructure du film en optimisant les paramètres de dépôt tels que les pressions dans la chambre de réaction ou la température du substrat.

Le silicium contraint est un autre exemple d'illustration de l'emploi du tétraèdre. Les propriétés électroniques du silicium – et en particulier la valeur du *gap*¹ – peuvent être modifiées en appliquant des contraintes qui agissent sur les distances interatomiques et donc sur le paramètre de maille.

La mise en forme de films minces de silicium dans lesquels des contraintes résiduelles très fortes dues aux interactions film/substrat peuvent être appliquées (jusqu'à quelques GPa) permet donc de définir des propriétés sur mesure du matériau désiré. Le substrat peut être dans ce cas un cristal de Si_xGe_{1-x} dont on contrôle parfaitement le paramètre par le taux de substitution en Ge². Il est possible ainsi d'envisager – et cela est même déjà en œuvre – toute une filière industrielle articulée autour du "gap

engineering". Le silicium poreux dont on peut adapter/contrôler les propriétés luminophores en variant son degré de porosité est une autre illustration. On pourrait trouver quantités d'autres exemples où le tétraèdre trouve emploi.

¹ Le *gap* d'un semi-conducteur est une spécificité de sa structure électronique : il délimite des zones énergétiques interdites aux électrons, et contrôle ainsi le comportement en température de sa résistivité électrique.

² Le taux de substitution en Ge est la proportion de Ge qui remplace le Si, c'est donc *x* dans le texte.

Sans en faire un modèle *sine qua non*, il est clair, à travers ces quelques usages, que tout développement de matériau passe par une ou plusieurs des étapes du tétraèdre et que ces relations sont particulièrement structurantes pour une science au cœur des matériaux fonctionnels : la cristallographie.

Bernard Chenevier, directeur de recherche CNRS, directeur adjoint du laboratoire LMGP

LE PLEIN D'ÉNERGIE

Des développements importants existent pour mettre au point de nouveaux matériaux susceptibles d'entrer dans la composition de générateurs électrochimiques. Ces derniers produisent ou stockent de l'énergie électrique.

À la clé : des applications et des marchés considérables.

Des ordinateurs aux téléphones mobiles en passant par l'alimentation de sites isolés, le besoin en sources d'énergie délocalisée représente l'un des enjeux majeurs du secteur de l'énergie. D'où l'importance du développement des générateurs électrochimiques soit pour produire immédiatement, soit pour stocker de l'énergie électrique.

1860 : le premier accumulateur au plomb

Le principe de fonctionnement de la quasi-totalité des systèmes de générateurs électrochimiques reste le même que celui mis en œuvre par Gaston Planté qui en 1860 invente le premier accumulateur au plomb. Il s'agit de réaliser un empilement de matériaux conducteurs électriques, suivant la structure suivante : métal 1 / matériau actif 1 / électrolyte / matériau actif 2 / métal 2.

Dans ce type d'empilement, la fonction production d'énergie électrique est assurée par le choix des matériaux actifs, grâce à leur transformation chimique. Quant à la fonction stockage de l'énergie, elle est assurée par une sélection judicieuse de l'électrolyte : ce matériau doit être conducteur ionique mais isolant électronique. Ainsi, de manière idéale, lorsque les deux métaux extrêmes ne sont pas reliés à un circuit extérieur, aucun court-circuit interne ne vient perturber l'état du système, qui stocke alors durablement l'énergie électrique.

Les générateurs électrochimiques actuellement commercialisés présentent une très grande variété. Indépendamment de leurs tailles, cette diversité s'exprime notamment dans le type de matériaux conducteurs utilisés : ils peuvent être liquides, comme l'électrolyte d'une bat-



Gaston Planté (1804-1869) inventa l'accumulateur au plomb en 1860, jetant ainsi les bases des systèmes de générateurs électrochimiques.

terie au plomb (solution aqueuse d'acide sulfurique) ; solides, comme le plomb et ses oxydes qui constituent les matériaux actifs d'une batterie au plomb ; ou même gazeux, comme les composés actifs utilisés dans la plupart des piles à combustibles.

Electrolytes : des progrès spectaculaires

Dans ce contexte, le développement de nouveaux matériaux conducteurs pour l'électrochimie apparaît comme très prometteur. C'est peut-être dans le secteur des électrolytes que les progrès récents se révèlent les plus spectaculaires.

Ainsi, les systèmes de batteries "lithium polymère", commercialisés ces dernières années. C'est l'étude et la mise au point de nouveaux matériaux polymères avec des propriétés de conduction ionique appréciables dans une gamme de température correspondant à une utilisation usuelle (- 20°C / + 80°C) qui ont rendu

possible le développement de ces produits. L'amélioration des performances de conductivité de tels matériaux nécessite des compétences variées : il faut comprendre les modes de conduction des ions dans ce type de milieu tout en synthétisant de nouvelles molécules. Et il convient également de se préoccuper du comportement mécanique et du vieillissement de ces matériaux.

Autre type de générateurs électrochimiques, actuellement en très fort développement : les piles à combustible. Là aussi, il existe un grand nombre de matériaux envisageables, qui permettent de concevoir des systèmes pour des fonctionnements basse ou haute température. En ce qui concerne les piles à combustibles haute température (supérieure à 500° C), les matériaux mis en œuvre sont principalement des céramiques à base d'oxydes. Le développement s'appuie sur la synthèse de nouveaux matériaux et la compréhension des phénomènes de conduction électrique dans les solides : purement ionique dans les électrolytes et mixte (ionique et électronique) dans les matériaux actifs.

Toutes ces recherches ne peuvent être menées sans une bonne connaissance des autres enjeux de ce type de produits, comme l'optimisation des modes d'utilisation (domaine du génie électrique). A travers ses différentes composantes, l'INP Grenoble est particulièrement bien placée pour ces interactions pluridisciplinaires. D'ores et déjà depuis trois ans, les étudiants de l'ENSEEG et de l'ENSIEG peuvent suivre en fin de scolarité une filière appelée "Production Décentralisée et Stockage de l'Énergie".

Christine Lefrou,
maître de conférences à l'ENSEEG

COMMENT PROCÉDER ?

Hors le procédé, il n'est pas de pièce. Un procédé qui va jouer sur la structure et les qualités du matériau final. D'où l'importance des études expérimentales menées en collaboration avec les industriels.

Un matériau n'est qu'un concept à qui il faut donner corps en fabricant une pièce. Cette pièce est l'aboutissement d'un procédé constitué d'une série d'opérations au cours desquelles des matières premières (éléments d'alliage, fibres, poudres, polymères, etc.) subissent des sollicitations thermiques, mécaniques, chimiques, voire électromagnétiques. Pour posséder les propriétés d'usage souhaitées, cette pièce doit présenter une certaine microstructure et un minimum de défauts. On peut aussi chercher à atteindre des cotes précises afin de réduire ou même d'éliminer des opérations de finition. Au-delà des caractéristiques de la pièce, la maîtrise du procédé se révèle également

importante, du point de vue industriel, pour en minimiser le coût, souvent très lié à la quantité d'énergie consommée.

Comprendre les différents phénomènes

Pour améliorer le procédé on peut jouer d'une part sur les caractéristiques des matières premières, d'autre part sur les paramètres de contrôle du procédé lui-même, par exemple le cycle thermique, les outils, l'environnement gazeux. Et pour pratiquer de manière rationnelle, il est nécessaire de comprendre les différents phénomènes qui se produisent au sein du matériau au cours de chaque opération, et mieux encore de les modéliser.

Tel est l'objectif de plusieurs équipes de

l'INP Grenoble, le plus souvent en collaboration avec des entreprises. Clé de voûte de ces travaux : l'étude expérimentale, en laboratoire, du comportement du matériau – ou éventuellement d'un matériau modèle plus simple à mettre en œuvre et à appréhender – au cours des différentes étapes du procédé. Cette étude doit se mener dans des conditions de température, de contrainte, d'environnement, etc., aussi proches que possible de celles de la réalité industrielle.

À différentes échelles

Elle est réalisée à différentes échelles, depuis l'échelle macroscopique, à laquelle s'effectuent le plus souvent les mesures de contraintes, de déformations, de température, jusqu'à celle définissant les détails les plus fins de la microstructure souhaitée. Aux côtés des techniques de microscopie traditionnelles, en constante amélioration, se développent des méthodes d'observation de l'évolution microstructurale in situ, c'est-à-dire au cours d'un processus thermique ou mécanique représentatif d'une étape du procédé. On peut citer notamment la tomographie utilisant le rayonnement synchrotron (voir article p. 27).

À partir des données expérimentales recueillies, les lois mécaniques et physico-chimiques gouvernant le comportement du matériau aux différentes échelles pertinentes sont identifiées et introduites dans des modèles numériques permettant de décrire des situations complexes. Objectif final : simuler le procédé à chacune de ces échelles avec des transferts d'information d'une échelle à l'autre. En la matière, chaque pierre ajoutée à l'édifice apporte une contribution à la compréhension de problèmes rencontrés pendant le procédé et à leur résolution.

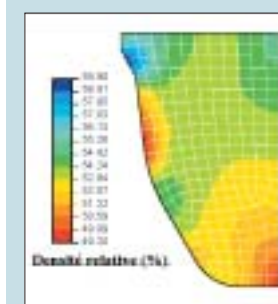
Didier Bouvard, directeur GPM2

Fabriquer des pièces dures à partir de poudres ?

Utilisés pour la découpe, l'usinage, le forage, etc., les composants en carbure cémenté sont classiquement fabriqués à partir de mélanges de poudres de carbure de tungstène et de cobalt qui sont comprimés dans un moule puis chauffés à 1 400°C, ce que l'on appelle le frittage. La qualité de la pièce obtenue dépend de sa microstructure, qui contrôle ses propriétés mécaniques, et de ses dimensions qui doivent s'approcher au plus près de cotes finales pour réduire, voire même éliminer des opérations de finition forcément difficiles et coûteuses.

Un problème qui justifie les recherches menées depuis plusieurs années à l'INP Grenoble. Elles consistent par exemple à modéliser numériquement le procédé à l'échelle macroscopique, pour éviter la formation de défauts pendant la compression et contrôler les changements de forme pendant le frittage. Autre exemple : comprendre les phénomènes responsables de l'évolution microstructurale pendant le frittage, notamment pour conserver, grâce à des inhibiteurs de croissance, la microstructure submicronique des poudres de départ, synonyme de propriétés remarquables.

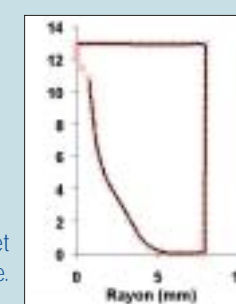
Olivier Alvain, docteur INPG, ingénieur R&D à Sandvik Grenoble



Simulation numérique de la fabrication d'une filière d'extrusion axisymétrique en carbure cémenté

(a) Champ de densité dans une demi-section après compression

(b) Dimensions prédites et mesurées après frittage.



(Collaboration 3S/GPM2/Sandvik)

VIE, MORT ET RÉSURRECTION des matériaux

Mieux connaître les mécanismes de vieillissement et de d'endommagement des matériaux. Étudier les possibilités de recyclage et de valorisation. Deux enjeux forts pour le génie des matériaux à l'heure du développement durable.

Raisonnement plus facilement à l'échelle planétaire, et à penser de plus en plus cette planète comme un système quasi-fermé, à ressources finies : cette conséquence heureuse de la mondialisation sur le monde scientifique et industriel conduit à se préoccuper des ressources en amont, des déchets en aval, ainsi que du coût environnemental et énergétique global. Et les producteurs commencent à raisonner de plus en plus en termes de gestion du cycle de vie des produits (Product lifecycle management, ou PLC, voir figure page suivante).

La connaissance des mécanismes de vieillissement et d'endommagement permet aujourd'hui d'envisager de concevoir des matériaux dont les propriétés sont adaptées à l'usage. En maîtrisant davantage les relations composition/microstructure/propriétés, le génie des matériaux ouvre la voie aux matériaux "à la carte" dans les limites des conditions de viabilité économique. Par ailleurs, la mise en œuvre de procédures rationalisées et systématiques de sélection des matériaux permet une meilleure adéquation matériau/fonction/procédé.

Défaillance fatale

Parmi les mécanismes de défaillance qui conduisent à la fin de la vie utile d'une pièce de structure, la rupture brutale en service est la plus spectaculaire du fait de ses conséquences parfois catastrophiques. C'est heureusement aussi la moins fréquente, grâce au savoir-faire croissant des concepteurs.

La défaillance fatale est beaucoup plus souvent la conséquence d'une dégradation progressive, notamment par usure des liaisons, perte de matière par corro-

- Moi, je serai une machine à laver



© Sollac - Aciers pour Emballage

sion chimique, galvanique ou thermique, propagation sous-critique progressive de fissures de fatigue ou de corrosion sous contrainte, ou par vieillissement et dégradation en volume des propriétés d'usage.

Des efforts de recherche importants sont consacrés pour étudier et modéliser ces phénomènes, tant dans les matériaux métalliques que dans les polymères, les céramiques ou les composites. L'étape



suivante consiste à intégrer ces modèles dans les outils informatiques de dimensionnement et de calcul prédictif qu'utilisent désormais couramment les concepteurs.

Des problèmes analogues se posent pour les composants à fonction physique ou physico-chimique (autre que mécanique) tels que les capteurs environnementaux, les piles ou accumulateurs électriques, ou encore les circuits micro-électroniques qui deviennent un objet d'étude privilégié dans le contexte industriel grenoblois : sur ces structures multimatériaux complexes à échelle submicronique, l'accumulation d'endommagement en service ou même en cours d'élaboration peut conduire à des défaillances critiques.

Microfissuration, micro-délamination, vieillissement par interdiffusion en volume ou aux interfaces doivent être pris

en compte dès le niveau de la conception pour maîtriser la fiabilité et la durée de vie.

Le défi des ingénieurs de demain

Tout un champ d'application des connaissances en science et génie des matériaux s'ouvre actuellement avec la généralisation du recyclage et du traitement des déchets. Si les matériaux métalliques sont déjà largement recyclés et valorisés (80 % en moyenne, en raison de leur relative facilité d'identification et de leur insertion dans des circuits industriels et économiques bien structurés), ceci est loin d'être le cas pour les autres classes de matériaux, minéraux (à l'exception des verres) ou polymères. Les composites et les pièces multimatériaux posent les problèmes les plus compliqués. En effet, la diversité des maté-

Le cycle de vie des matériaux

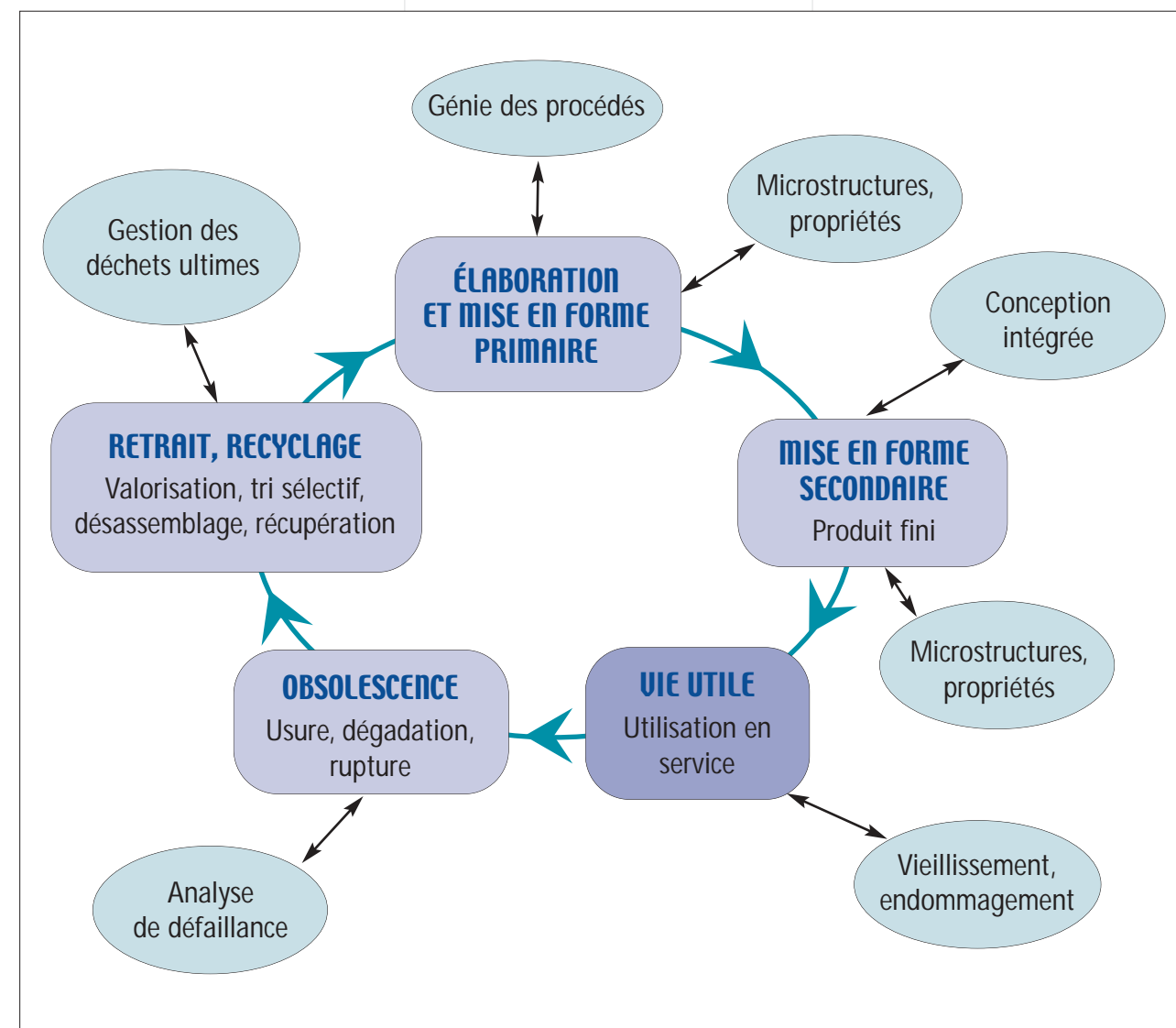
En s'appuyant sur les compétences des laboratoires de recherche du site grenoblois, l'INP Grenoble s'efforce d'introduire dans la formation de ses élèves ingénieurs les compétences scientifiques et techniques nécessaires pour prendre en charge cette nouvelle évolution, notamment grâce à la création de filières transversales interdisciplinaires communes à plusieurs écoles. Dans ce cycle de vie, la partie d'utilisation en service constitue évidemment l'étape cruciale, dont consommateurs et producteurs souhaitent tous maîtriser la durée.

riaux qui les composent nécessite des voies de retraitement divergentes si l'on entend les valoriser de manière acceptable pour l'environnement, et à un coût supportable.

Comment séparer les différents constituants d'un ski ou d'un ordinateur personnel avec ses éléments mécaniques, ses conducteurs électriques et ses milliers de composants microélectroniques, ou même simplement les fibres de verre et la matrice thermodurcissable d'une pièce en composite de grande diffusion ?

Des solutions – encore imparfaites et provisoires – se mettent peu à peu en place : l'un des défis les plus difficiles que les ingénieurs de demain auront à relever, auquel il faut les préparer dès aujourd'hui.

Michel Dupeux, Pr. UJF, LTPCM
(michel.dupeux@ltpcm.inpg.fr)



LES DÉFIS de la miniaturisation

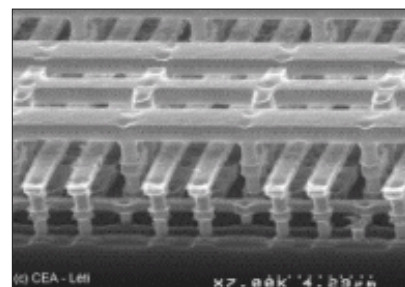
Quelle structure de matériau et comment l'élaborer ?
À petite échelle, la maîtrise de la science des matériaux devient cruciale.
Tour d'horizon des problèmes rencontrés au niveau de la recherche appliquée et de l'industrie.

Tout choix et mise en œuvre d'un matériau relève d'un compromis que la miniaturisation rend encore plus complexe. D'abord parce qu'il faut connaître les propriétés du matériau à l'échelle considérée : extrapoler des caractéristiques "en volume" ne suffit pas, car on ne prend pas en compte les effets des interfaces avec les autres composants de la structure. Ensuite parce qu'il convient de respecter des problèmes de compatibilité de composites multimatériaux. Enfin parce qu'il faut prendre en compte de nombreux phénomènes et couplages fondamentaux (cinétiques des évolutions physico-chimiques, couplages électrodynamiques, effets capillaires et microfluidique, dimensionnement pour les aspects de thermique ou d'apport énergétique...).

¹ La permittivité d'un isolant est sa capacité à affaiblir les forces électrostatiques.

Le câblage du signal électrique (interconnexions Cu)

Parmi les problèmes actuels des "fondeurs" de l'industrie des semi-conducteurs : la fonction de "câblage" entre les



circuits logiques et l'extérieur du dispositif. La solution actuelle consiste à élaborer par étages successifs une structure de câblage 3D de lignes conductrices permettant *in fine* de relier le circuit avec l'extérieur. Pour cela on utilise du cuivre "gainé" par une couche de quelques nanomètres d'épaisseur (la barrière de diffusion, en nitrures métalliques) entouré d'une matrice isolante (matériaux lowK) et de barrières de gravure (un nitrure de silicium, nécessaire au "dessin" de la structure).

La recherche doit résoudre trois problèmes. Premièrement, assurer une stabilité microstructurale des matériaux soumis à des traitements thermo-mécaniques importants pour éviter par exemple des phénomènes de grossissement de cavités dans le cuivre (« stress

voiding »), ou de déplacement de matière (la forte densité de courant électronique conduit à créer une pression mécanique au sein du conducteur).

Deuxièmement, définir une bonne barrière de diffusion qui empêche le cuivre de diffuser dans la structure tout en assurant de bonnes interfaces entre le métal et l'isolant

Enfin, créer des matériaux à très bas coefficient diélectrique, dits "low K". À mesure que les dimensions se réduisent, il faut en effet éviter le couplage de capacité entre des lignes (relié au coefficient diélectrique de l'isolant) et diminuer le temps de propagation du signal dans les interconnexions (relié au produit résistance ohmique du conducteur par la capacité diélectrique de l'isolant). La mise au point de nouveaux matériaux nanoporeux ultraLowK (matrices amorphes ou polymère à base de liaisons Si-O,H,C) compte parmi les solutions envisagées. Cependant en plus de l'exceptionnel bas niveau de permittivité¹ diélectrique requis, la tenue mécanique de ces couches poreuses dans l'intégration pose problème.

Les questions soulevées par la miniaturisation

Les "piézo" passés au crible

Pour les résonateurs piézo-électriques à onde de volume utilisés pour filtrer les signaux RF dans les systèmes de communication sans fil, de nombreuses recherches sont menées pour qualifier l'évolution du matériau piézo-électrique (souvent l'AlN) en fonction des conditions finales d'utilisation de ces dispositifs : oxydations, fatigue piézo-électrique, auto-échauffement...

Exemple : le développement d'oscillateurs dans le domaine du GHz (systèmes micro-ondes utilisés pour transmettre des données sans fil). Il s'agit de réaliser des filtres d'ondes en volume (ou en surface pour les dispositifs plus anciens) à partir de résonateurs constitués d'une couche piézo-électrique. Autre exemple entièrement réalisé à l'INP Grenoble : le capteur de pression à jauges piézo-résistives.

Dans ces deux cas, le problème consiste à déterminer l'influence des matériaux sur le vieillissement du dispositif susceptible d'altérer les caractéristiques piézo-électriques.

risation des interconnexions sont sources de recherches fondamentales. À l'INP Grenoble, pas moins de six thèses et post docs portent sur ce sujet.

Micromachines et capteurs (MEMS)

Les MEMS se caractérisent par une très grande diversité technologique et par l'utilisation d'un très grand nombre de matériaux (silicium, verres, plastique...). Cette relative flexibilité a permis d'atteindre des fonctions électromécaniques, électrothermiques, optoélectroniques...

mais continue à soulever de nombreuses interrogations. Tenue thermomécanique en conception et durabilité, problèmes d'écoulement de la chaleur..., à petite échelle, les problèmes de matériaux se multiplient.

Pour tout arranger, la tendance actuelle consiste à munir les microcapteurs de circuits intégrés – sur la même puce de préférence –, dont le rôle consiste à traiter et à conditionner les informations enregistrées par le capteur. Enfin, il faut concevoir un emballage approprié pour protéger le capteur de son environne-

ment souvent sévère.

Cette intégration de type "système sur puce" accroît la complexité de ces micro dispositifs et pourrait éventuellement nuire à leur fiabilité. C'est pour mieux maîtriser cette intégration que la communauté scientifique des secteurs matériaux et MEMS travaillent en étroite collaboration. Objectif : qualifier l'impact des propriétés des matériaux sur les performances et la fiabilité des MEMS (voir encadré).

Marc Uerdier, chargé de recherches CNRS
Jumana Boussef, chargée de recherches CNRS

Témoignage > Sylvain Maîtrejean

CEA-LETI, département Nanotec, Laboratoire BackEnd

« Je suis ingénieur physicien et j'ai complété cette formation de base par une thèse en Science et génie des matériaux. Mon domaine de recherches concernait plus particulièrement les propriétés mécaniques d'aciers et consistait à relier les propriétés macroscopiques aux caractéristiques microstructurales du matériau.

Mon rôle actuel au LETI consiste à développer des briques technologiques d'interconnexions avancées. Pour cela, je dois avant tout m'appuyer sur les différents procédés développés au LETI (étapes dépôts, gravure, lithographie...) et appréhender les problèmes spécifiques à la compatibilité entre procédés/matériaux pour réaliser des structures.

Ensuite, il s'agit de concevoir et d'effectuer les caractérisations pertinentes sur les dispositifs réalisés (électrique, mécanique...).

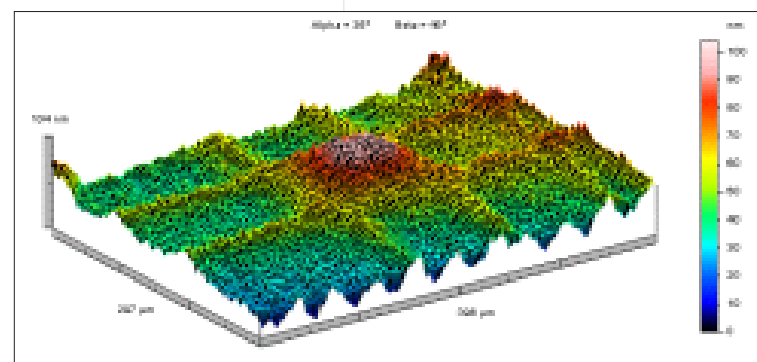
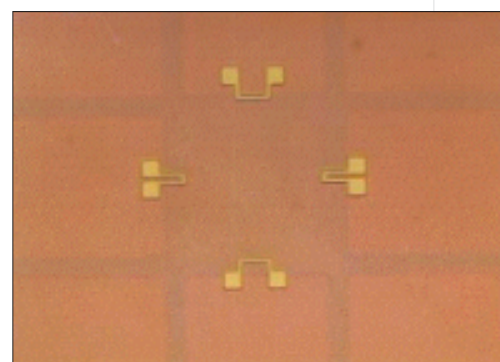
La thèse permet, d'une part, d'acquérir une culture générale en science des matériaux.

Au cours de ces quatre dernières années, j'ai pu appliquer ces connaissances aux thématiques d'interconnexions : on peut citer la compréhension des mécanismes de recristallisation du cuivre ou la caractérisation du comportement mécanique des diélectriques basses permittivités.

D'autre part, une thèse en science des matériaux suit une démarche particulière proche des sciences de l'ingénieur. En effet, il s'agit de résoudre des problèmes complexes en utilisant différentes disciplines et notions (thermodynamique, chimie, mécanique...).

En microélectronique, nous devons réaliser des architectures complexes et résoudre rapidement les problèmes en appréhendant de façon globale procédé de fabrication, fonction et géométrie.

Cette démarche de synthèse est celle utilisée en science des matériaux. »



Capteurs de pression à jauges piézo-résistives en technologie silicium (vue de dessus et profil 3D)
(IMEP-UMR-5130-CNRS-INPG-UJF)

L'IFR "SCIENCE ET TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX" : un regard vers l'avenir

En réunissant les expertises de l'INP Grenoble et de ses partenaires grenoblois, l'IFR "Science et technologie des matériaux" peut relever les défis de la recherche de demain.

D'une part, notre monde, bien que de plus en plus "dématérialisé", a besoin de produits assurant des fonctions dans des conditions et pour une durée données, ce qui nécessite des matériaux ou un ensemble

de matériaux capables de les assurer. D'autre part, l'INP Grenoble et son environnement universitaire et scientifique offre un ensemble exceptionnel de laboratoires aux compétences complémentaires, pour répondre à ces besoins dans

le présent et dans l'avenir. Ces deux constats ont présidé à la naissance de l'IFR (Institut fédératif de recherche) "Science et Technologie des Matériaux : structure-fonctions-durée" (ISTM). Sa mission : donner à l'INP Grenoble et à

ses partenaires (notamment l'UJF et le CNRS) une force de compétence et d'initiative autonome en science et technologie des matériaux, capable d'anticiper les besoins et les évolutions au-delà des grands mouvements porteurs du moment (énergie, microélectronique, micronanotechnologies, biotechnologies...)

L'ISTM, qui se met en place, s'appuie sur 180 chercheurs et enseignants-chercheurs, répartis dans 8 laboratoires (voir encadré) et dispose pour l'instant de deux outils :

- un "centre de projet", avec un comité scientifique indépendant, pour faire émerger des thèmes de recherche collectifs à long terme. En relation avec l'industrie et les formations doctorales, il organisera des séminaires thématiques pour identifier puis initier et évaluer les idées et lancer les projets qu'il soutiendra ;

- le Consortium des moyens technologiques communs (voir encadré). Cette plate-forme technologique a pour mission d'apporter à la recherche des moyens et des compétences en caractérisation des matériaux toujours plus performants. ●

Jean-Marc Chaix, directeur de l'IFR

CMTC - Plate-forme technologique en caractérisation des Matériaux

Créé en 1977 au sein de l'INP Grenoble, le Consortium des moyens technologiques communs (CMTC) met à la disposition des chercheurs et des écoles une plate-forme d'instruments scientifiques de caractérisation : microscopie électronique à balayage, microanalyse X, diffraction X, spectrométrie Raman...

Prestataire de services pour d'autres établissements et centres de recherche publics ou privés, le CMTC a tissé des liens très forts avec plus d'une centaine d'entreprises de la région Rhône-Alpes qui lui font confiance (Araymond, Ascometal, Crolles2 Alliance, Thales Avionics Lcd...). Un partenariat fructueux. Ainsi selon Joan Bonnafois, responsable R&D Produits pour condensateurs, Satma à Goncelin (Isère) : « cela fait de très nombreuses années que nous travaillons en partenariat avec le CMTC pour caractériser nos échantillons. Les moyens mis à notre disposition, la compétence de l'équipe ainsi que son implication ont fait de ce partenariat un élément majeur de notre recherche et développement. »

De son côté, Patrice André, responsable Monitoring Rendement, Thales Avionics Lcd à Moirans (Isère) explique : « nous travaillons avec le CMTC car nous apprécions sa compétence technique et la capacité de son équipe à s'impliquer dans la résolution de nos problèmes. »

Autre mission du CMTC : la formation. Plus de 600 chercheurs, ingénieurs et techniciens ont suivi le stage en microscopie électronique à balayage.

Laurent Maniguet (EEG 90), directeur du CMTC, e-mail : laurent.maniguet@cmtc.inpg.fr

Les huit laboratoires "matériaux"

La liste des laboratoires de l'IFR "Science et technologie des matériaux", leur structure et leurs spécialités.

■ EPM (Élaboration par procédés magnétiques)	UPR 9033 ass. UJF - INPG	> Procédés d'élaboration, traitements de surface, chimie des matériaux.
■ GPM2 (Génie physique et mécanique des matériaux)	UMR 5010 CNRS - INPG	> Mécanique des matériaux, mise en forme, métallurgie chimique.
■ LEPMI (Laboratoire d'électrochimie et de physico-chimie des matériaux et des interfaces)	UMR 5631 CNRS - INPG - UJF	> Capteurs, nanomatériaux, polymères fonctionnels, batteries, piles à combustibles, corrosion, génie des procédés.
■ LGP2 (Laboratoire du génie des procédés papetiers)	UMR 5518 CNRS - INPG - CTP	> Génie des procédés (élaboration, transformation), matériau papier, chimie de la biomasse végétale, bio-procédés, polymères, capteurs.
■ LMGP (Laboratoire des matériaux et du génie physique)	UMR 5628 CNRS - INPG	> Chimie des matériaux, cristallogénèse, procédés de synthèse, couches minces par méthodes chimiques, composants électroniques et optoélectroniques.
■ LTPCM (Laboratoire de thermodynamique et physico-chimie métallurgiques)	UMR 5614 CNRS - INPG - UJF	> Thermodynamique, métallurgie physique, microstructures, milieux divisés, interfaces, génie des procédés d'élaboration, systèmes multiphasés.
■ L3S (Laboratoire sols-solides-structures) Équipe "Génie mécanique des matériaux"	UMR CNRS - INPG - UJF	> Génie mécanique, mécanique des matériaux, mécanique des structures.
■ Laboratoire de Rhéologie	UMR 5520 CNRS - UJF - INPG	> Propriétés des matériaux, procédés de mise en œuvre.

Les nouveaux matériaux vus par Bernard Castellon



FORMATIONS : demandez le programme !

Des ingénieurs capables de maîtriser plusieurs disciplines, tout en étant de bons spécialistes. L'INP Grenoble crée des filières communes à plusieurs écoles et développe des masters, notamment en collaboration avec le Viêt-nam. Tour d'horizon des formations dans le domaine des matériaux.

La formation des ingénieurs : mutualiser les connaissances

Différentes écoles ont leurs propres formations "matériaux", avec des spécificités diverses : la physico-chimie des métaux et alliages, des polymères et des céramiques et les procédés d'élaboration associés sont enseignés à l'ENSEEG ; les propriétés physiques comme le magnétisme ou la conduction électrique, la caractérisation aux échelles fines, la modélisation en science des matériaux sont abordées à l'ENSPG ; la mécanique et la définition de produits est assurée à l'ENSHMG. Cependant, de nombreuses industries cherchent des ingénieurs capables de maîtriser plusieurs disciplines, tout en étant de bons spécialistes dans une

branche donnée. L'INP Grenoble a donc choisi de mutualiser les connaissances dispensées dans ses différentes écoles, afin de former ces spécialistes capables de travailler efficacement avec d'autres spécialistes. Ceci est particulièrement vrai par exemple dans le domaine des matériaux de structure, un domaine multidisciplinaire s'il en est (mécanique, physique, chimie) et qui concerne de nombreux secteurs industriels : les matériaux, l'énergie, les transports, par exemple. L'INP Grenoble forme des ingénieurs "Matériaux de structures" (MS) "multiculturels" : spécialisés dans un domaine mais aussi capables de travailler de manière dynamique et pertinente avec des ingénieurs d'autres disciplines.

Ainsi, les cours sont organisés conjointement par l'ENSPG, l'ENSHMG et l'ENSEEG. Venant de trois horizons différents, les enseignants collaborent pour offrir une nouvelle approche interdisciplinaire des matériaux de structure, à l'aide d'une pédagogie active (travail en groupe, projets encadrés en liaison avec le monde industriel). Cette formation se veut résolument tournée vers l'industrie, dans les domaines de l'énergie, du transport, ou des matériaux. La recherche est bien sûr impliquée, avec la participation des laboratoires de rattachement des enseignants, la réalisation des projets et la mise en œuvre de TP sur des dispositifs performants. Cette formation est très ouverte à l'international, puisqu'elle accueille régulièrement

des élèves étrangers dans le cadre du réseau Cluster mais aussi des masters internationaux.

Les matériaux propres au stockage de l'énergie (pile, pile à combustible,...) sont, eux, abordés dans le cadre de l'option "Production décentralisée et stockage de l'énergie" (PDSE), commune à l'ENSIEG et l'ENSEEG. Cette filière permet de rassembler les compétences des électriciens et des électrochimistes pour développer de nouvelles sources d'énergie (piles à combustible) et de nouveaux moyens de stockage de cette énergie. Une autre jeune filière se tourne vers l'un des secteurs porteurs de la région grenobloise et s'inscrit dans le cadre du projet Minatec, le pôle d'innovation sur les micro- et nanotechnologies développé par le CEA-LETI et l'INP Grenoble. Cette filière "Matériaux pour la microélectronique et les microsystèmes" (3M) réunit l'ENSPG, l'ENSERG et l'ENSEEG. Elle forme des ingénieurs spécialisés dans la conception, l'élaboration, la caractérisation et la fiabilisation de systèmes microélectroniques et micromécaniques. Les trois écoles mettent en commun leurs différentes cultures scientifiques pour aborder tous les aspects : conception de circuits (ERG-PG), procédés de fabrication (EEG), propriétés physico-chimiques (EEG) et électriques (ERG-PG) des matériaux, techniques de caractérisation (PG), tests électriques (ERG)...

La formation de ces ingénieurs s'effectue, entre autres, dans les salles blan-

Témoignage > Sami Oukassi

Élève-ingénieur à l'ENSEEG en double cursus "Filière 3M" et "Master SGM"

« Cette nouvelle filière 3M m'a permis de poursuivre mes études d'ingénieur en sciences et génie des matériaux dans un domaine à la pointe de la technologie et en étroite relation avec le milieu industriel (notamment dans le bassin grenoblois). Par ailleurs, avec cette option inter écoles, j'ai pu échanger des compétences avec des étudiants de cursus différents. Enfin, le fait d'effectuer un master 2A (ex-DEA) en parallèle m'a bien conforté dans le choix d'orienter ma carrière vers la recherche et développement, activité en plein essor dans le domaine de la microélectronique et des microsystèmes. »

ches du CIME (Centre interuniversitaire de microélectronique) où ils fabriquent des circuits intégrés (jusqu'aux technologies 0,6µm) et des microsystèmes mécaniques. Ce savoir-faire pratique se complète d'un travail sur des logiciels de simulation (logiciel ANSYS) pour la conception de ces circuits. Cette filière ouvre sur des postes en recherche et développement, production ou caractérisation dans le secteur de la microélectronique et des microsystèmes.

La formation par la recherche

Au sein de l'INP Grenoble, la formation par la recherche est assurée dans des "masters" dont les thèmes couvrent le large éventail des applications des matériaux. Les enseignements sont essentiellement centrés sur la compréhension et le contrôle des mécanismes physiques mis

en jeu lors de l'élaboration et de l'utilisation des matériaux.

■ Ainsi, le master "Matériaux et génie des procédés" (MGP) propose trois spécialités dans ce domaine :

- "Science et génie des matériaux" s'attache à comprendre les phénomènes régissant les transformations des matériaux, de l'élaboration aux conditions de fonctionnement ;
 - "Électrochimie" se focalise sur la thermodynamique, la cinétique et les applications de l'électrochimie ;
 - enfin, "Génie des procédés" (en collaboration avec l'université de Chambéry et de l'École des Mines de Saint-Étienne) forme les étudiants à la conception, la mise en œuvre et l'optimisation de procédés de transformation et d'élaboration.
- Le master "Mécanique : conception, géomécanique, matériaux" aborde,

Témoignage > Sandrine Miolanne

Promotion 2002 "Matériaux de structure", ingénieur Renault Essais non-destructifs

« Je suis diplômée de l'ENSEEG (juillet 2002), après avoir suivi la formation "Matériaux de structure" (MS) avec des étudiants et des enseignants de l'ENSPG et de l'ENSHMG. Dès le début de la formation, j'ai eu le sentiment de mettre un pied dans le monde de l'entreprise : les cours sont très orientés sur des problèmes industriels et non sur des cas d'école et le travail est organisé en groupe, au sein duquel on s'organise comme on le souhaite (bibliothèque, à la maison, salles des différentes écoles...) avec un réel appui des enseignants si besoin. À la fin de la dernière année, on réalise un projet industriel en équipe, pendant 4 mois. Un projet dont le sujet est choisi par un industriel qui attend un travail précis et des résultats. Pour ma part, j'ai travaillé sur l'éco-conception d'un cache-moteur de Laguna pour Renault et c'est ainsi que j'ai trouvé mon projet de fin d'études (prolongation du projet industriel). Quinze jours après la fin de ce stage, j'ai été embauchée par Renault en tant qu'ingénieur Essais non-destructifs ! Enfin, il est très appréciable de voir les frontières tomber entre les écoles. Cette option est aussi un moyen de rencontrer d'autres étudiants, d'autres écoles et de prendre totalement conscience de faire partie de l'INP Grenoble : un regroupement d'écoles. »

Contacts pour informations

Formation matériaux des écoles	ENSEEG ENSHMG ENSPG	yves.brechet@ltpcm.inpg.fr didier.imbault@inpg.fr françoise.hippert@inpg.fr
Formations communes interécoles	Matériaux de Structure Matériaux pour la microélectronique Stockage de l'énergie	muriel.veron@ltpcm.inpg.fr fabien.volpi@inpg.fr jean-pierre.petit@inpg.fr
Formations par la recherche	Science et génie des Matériaux Génie des procédés Electrochimie Nanostructures et grands instruments	catherine.colinet@ltpcm.inpg.fr jean-claude.roux@efpg.inpg.fr christine.lefrou@lepmi.inpg.fr michel.schlenker@enspg.inpg.fr

comme son nom l'indique, de nombreux aspects propres à la mécanique, notamment le comportement des matériaux au cours de leur mise en forme ou en situation de service pour le produit considéré.

■ Enfin, le master "Physique des matériaux : des nanostructures aux grands instruments" (en collaboration avec l'Université Joseph-Fourier) propose un enseignement de physique générale de la matière condensée et des matériaux fonctionnels, ouvrant sur une vaste

gamme de sujets sur les matériaux innovants, nanostructures (Minatec) et grands instruments (rayonnement synchrotron).

Ces masters sont bien sûr ouverts à l'international par l'accueil d'étudiants étrangers ou la réalisation de stage à l'étranger.

Particularité de l'INP Grenoble : l'établissement veut également développer des filières équivalentes, à l'étranger, avec des partenaires. Ainsi, un master "Matériaux de structure" et un master

"Matériaux pour la microélectronique" sont en projets à l'Institut national polytechnique de Hanoï et à l'Institut national polytechnique de Hô Chi Minh-Ville au Viêt-nam. Ces nouvelles filières s'appuient sur des collaborations scientifiques très fortes entre l'INP Grenoble et les INP vietnamiens, et sur des laboratoires locaux performants. ●

Muriel Véron, Fabien Volpi, Didier Imbault et Rémy Dendievel, maîtres de conférences à l'INP Grenoble

MATÉRIAUX NOUVEAUX : QUELQUES DEFINITIONS

■ Un **matériau composite** est un assemblage de matériaux de natures différentes qui possède des performances supérieures à celles des composants pris séparément.

Un composite est généralement constitué d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue (la matrice). On distingue les composites à fibres constitués de fibres dont l'orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et les composites à particules.

■ Un **polymère** est constitué de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'unités de base (monomères). Le nombre moyen de monomères est appelé degré de polymérisation (élevé pour un haut polymère, faible pour un oligomère). Les homopolymères sont constitués d'un seul type de monomère, les copolymères de plusieurs. Certains composés organiques formant la matière vivante

(protéines, acides nucléiques, cellulose, chitine, latex, résines naturelles) sont des polymères, ainsi que de nombreux matériaux synthétiques (matières plastiques, élastomères, fibres, adhésifs). Le verre, les silicates ou le graphite peuvent être considérés comme des polymères.

■ Les **céramiques** sont tous les métaux manufacturés ou les produits qui sont chimiquement inorganiques, exception faite des métaux et de leur alliages, et qui sont obtenus généralement par des traitements à haute température.

■ Les **biomatériaux** sont des matériaux travaillant sous contrainte biologique. Selon la définition de Chester (1981), il s'agit de tout matériau non vivant utilisé dans un dispositif médical et visant à remplacer ou traiter un tissu, organe ou une fonction avec une durée de contact supérieure à trois semaines.

www.lesingenieursdelannee.com

Prix des Ingénieurs de l'année

Avant de définir et d'exercer des métiers exigeants, il est essentiel d'engager dans la vie. C'est dans un projet mérité, qui engage le quotidien du plus grand nombre, et respecte notre environnement. S'engager dans une aventure et remettre en cause l'existant pour en proposer les alternatives. C'est d'ailleurs dans une œuvre, approfondie et réfléchie, pour que les générations futures perpétuent l'héritage. Un ingénieur exigeant est un défi qui mérite attention et reconnaissance. C'est pourquoi **l'Inria Nouvelle et Industrie et Technologies**, associés au **CGST**, ont créé le **Prix des Ingénieurs de l'année** destiné à encourager et reconnaître les professionnels d'ingénierie en récompensant chaque année les meilleurs d'entre eux.

Ingénieur d'une vie meilleure

LESCEM | SIGMA | ANDRA | arcelor | ASSISTAMÉRIQUE | LAFARGE