

INTRODUCTION ET GENERALITES SUR LES MATERIAUX

Les **ingénieurs** tous secteurs confondus sont confrontés à des questions de choix et d'**optimisation** de **matériaux** pour des usages de plus en plus ciblés et des **secteurs d'application** de plus en plus exigeants. Bénéficiez d'un outil d'accompagnement complet sur les **propriétés**, les procédés et les voies d'amélioration pour concevoir et mettre en œuvre des **matériaux innovants, performants** et à **haute valeur ajoutée**.

QU'EST-CE QU'UN MATÉRIAU ?

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'Homme utilise et/ou conçoit pour fabriquer des objets, construire des bâtiments ou des machines.

Les matériaux sont différenciés selon leur **provenance** (issus d'êtres vivants par exemple) et leurs **propriétés**, qu'elles soient mécaniques (flexibilité ou rigidité...), chimiques (perméabilité ou imperméabilité à l'eau...) ou encore physiques (conductivité de l'électricité ou de la chaleur...).

Ils sont généralement classés en **différentes grandes familles** :

- **Les matériaux métalliques** qui regroupent les métaux : fer, cuivre, bronze et les alliages métalliques : acier inoxydable
- **Les matériaux organiques** qui sont issus d'êtres vivants, plantes ou animaux (bois, coton, papier...)
- **Les matériaux minéraux ou inorganiques** : roche, céramique, verre.
- **Les matériaux plastiques**, qui, en général proviennent de combustibles dits fossiles se trouvant dans le sol, comme le pétrole par exemple.
- **Les matériaux composites** qui combinent plusieurs matériaux de famille différente pour obtenir de multiples propriétés (exemple : fibre de carbone).

Les principales caractéristiques des différentes familles de matériaux

MATÉRIAUX MÉTALLIQUES <ul style="list-style-type: none">• Résistance mécanique• Résistance aux torsions• Conductivité électrique et thermique	MATÉRIAUX ORGANIQUES <ul style="list-style-type: none">• Facilité de mise en forme• Biodégradable	MATÉRIAUX COMPOSITES <p>Les propriétés des matériaux composites dépendent des matériaux rentrant dans sa composition et des moyens de réalisation</p> <p><i>Exemple :</i> Le béton armé combine la résistance mécanique du béton (minéral) à la capacité de résistance aux torsions de l'acier (métallique).</p>
MATÉRIAUX MINÉRAUX OU INORGANIQUES <ul style="list-style-type: none">• Rigidité• Dureté• Résistance mécanique• Fragilité aux torsions• Résistance chimique	MATÉRIAUX PLASTIQUES <ul style="list-style-type: none">• Facilité de mise en forme• Élasticité	

© 2016 CEA

Les principales caractéristiques des différentes familles de matériaux. © CEA

Les matériaux composent tous les objets qui nous entourent. Le choix des matériaux qui constituent un objet dépend des besoins et propriétés voulues pour l'objet. La combinaison de certains matériaux permet de combiner plusieurs propriétés. Ainsi, le béton armé, constitué de béton et d'acier, permet de réaliser des constructions qui pourront supporter d'importantes charges (caractéristique du béton) mais aussi des efforts de traction (caractéristique de l'acier).

L'HOMME CRÉATEUR DE MATÉRIAUX DEPUIS L'ÂGE DE PIERRE

Depuis toujours, les matériaux ont joué un rôle clé dans la société humaine. Dès l'âge de pierre, l'Homme taille le silex pour créer ses premiers outils. Lorsque le cuivre et le bronze sont découverts, de nouveaux usages naissent et viennent changer les modes de vie. Au fur et à mesure des découvertes et conception de nouveaux matériaux, l'Homme fait évoluer ses outils, ses constructions, ses modes de vie, et ses besoins.

COMMENT SE CONÇOIVENT LES MATÉRIAUX ?

Du laboratoire à l'industrie

La recherche et le développement dans le domaine des nouveaux matériaux sont importants car ils conditionnent en grande partie les avancées scientifiques et les innovations technologiques de demain. **Les matériaux sont souvent la clé de l'essor d'une technologie.** Par exemple, la

démocratisation des téléphones et ordinateurs portables a été permise en partie grâce aux efforts de recherche et développement menés sur les matériaux des batteries de recharge de ces appareils.

Pour concevoir un nouveau matériau, les ingénieurs et chercheurs vont d'abord commencer à dresser le « portrait-robot » type du matériau à partir de l'**analyse des besoins et des attentes des industriels et consommateurs** finaux. Ils conçoivent ainsi un cahier des charges avec les propriétés voulues pour le matériau : ce dernier doit-il être résistant ? Doit-il supporter des hautes températures? Doit-il conduire l'électricité ?... Outre les propriétés recherchées pour le matériau, les scientifiques doivent considérer d'autres facteurs tels que le budget de conception et de réalisation du matériau, les matières premières à utiliser et leur disponibilité, l'impact de la fabrication du matériau sur l'environnement et penser au devenir du matériau en fin de vie.

Après avoir défini le cahier des charges, les scientifiques vont chercher à réaliser le matériau par différentes voies (procédés de synthèse chimique, procédés de cuisson, procédé de fabrication additive...). Cette démarche nécessite au préalable un travail théorique d'analyse des connaissances scientifiques et techniques actuelles, complété par des **modélisations et simulations numériques du matériau**. Ces modèles numériques, réalisés à l'aide d'ordinateurs ou de supercalculateurs, permettent de prévoir en amont les propriétés et le comportement sur le long terme du matériau. Durant les différentes phases de conception et de réalisation du matériau, des expériences de caractérisation physique et chimique sont effectuées pour vérifier l'adéquation entre la théorie, les modèles prédits numériquement et la réalité physique.

Enfin, lorsque le matériau est fabriqué à l'échelle du laboratoire, il reste encore quelques étapes avant une mise en œuvre industrielle. Celle-ci doit en effet intégrer de nouvelles contraintes liées à une fabrication en série tout en conservant les performances du matériau.

La fabrication additive : des matériaux imprimés en 3D

La fabrication additive consiste à créer un objet couche par couche, à partir d'un modèle réalisé par ordinateur. Elle s'oppose aux méthodes traditionnelles, dites « soustractives », qui permettent de façonner une pièce dans un bloc de matière.

Pourquoi la fabrication additive suscite-t-elle autant d'intérêt ? Le premier avantage de ce mode de fabrication, à partir d'imprimantes 3D, est la liberté de conception géométrique. A cet avantage, s'ajoute celui des propriétés physico-chimiques. Les pièces étant conçues couche par couche, il est possible d'attribuer à l'une d'elle certaines propriétés et d'autres à sa voisine. Enfin, les technologies d'impression 3D pourraient permettre, en théorie, d'économiser les ressources en matières premières, dans la mesure où elles évitent la génération de chutes de

matériaux, inévitables lorsqu'une pièce est usinée de façon soustractive à partir d'un plus gros bloc.

LES ENJEUX DES NOUVEAUX MATÉRIAUX

Fabriquer des matériaux plus respectueux de l'environnement et recycler les matériaux

L'enjeu commun à toutes les recherches actuelles menées sur les matériaux est le développement durable. L'objectif est d'intégrer, dès le départ, dans les étapes de fabrication du matériau une optimisation de l'efficacité et du coût énergétique des procédés, une économie et un recyclage des matières premières, une réduction des déchets ultimes et de l'impact sur la santé de l'Homme et sur l'environnement. L'objectif est également de créer des matériaux recyclables voire, dans certains cas, **biodégradables**.

Cet enjeu est représenté par la stratégie des « 3 R » :

- **Réduire**, dès la production, la quantité de ressources susceptibles de finir en déchets (par exemple, limiter les emballages...).
- **Réutiliser** les produits usagés constitués de matériaux pour leur donner une deuxième vie. (Par exemple, collecte des téléphones portables qui sont défectueux ensuite reconditionnés et revendus).
- **Recycler** les matériaux en mettant en œuvre une filière de retraitement avec un tri sélectif des matériaux afin de les transformer en nouvelles matières premières qui pourront être réutilisées pour fabriquer de nouveaux matériaux.

La chimie verte, inspirée du concept de développement durable, peut aider à concevoir des matériaux plus facilement recyclables. Ainsi, les scientifiques cherchent désormais à limiter la production de matériaux issus du pétrole, en utilisant des **matériaux biosourcés**, à partir d'autres matières premières que des hydrocarbures, tout en conservant les propriétés des plastiques. Par exemple, des plastiques, produits à partir de molécules issues de l'huile de ricin ou encore de déchets viticoles.

Les enjeux des matériaux pour la santé

En matière de santé, les nouveaux matériaux peuvent être utilisés sous forme de pansements ou de textiles chirurgicaux. Ils peuvent également avoir pour finalité d'être utilisés à l'intérieur du corps. Dans ce cas, ils doivent être tolérés par l'organisme mais aussi résister sur le long terme à un milieu chimiquement évolutif.

Ces matériaux supportés par l'organisme sont appelés les biomatériaux. L'enjeu principal de la recherche pour ces matériaux est d'obtenir une bonne adaptation de l'organisme à l'introduction du biomatériau (implant, prothèse, ...) et une réponse appropriée en vue des fonctions déficientes à restaurer. Par exemple, des matériaux à mémoire de forme peuvent être utilisés (matériaux qui ont

la capacité de mémoriser une forme initiale même après une déformation) pour la composition des stents, appareils médicaux qui permettent d'éviter aux artères de se boucher à cause des caillots de sang.

Les enjeux des matériaux pour l'énergie

Au cœur du processus d'innovation des systèmes énergétiques, **les matériaux du futur devront répondre à des spécifications toujours plus exigeantes en termes de sûreté, d'économie d'élaboration, de résistance, de durabilité, d'impact environnemental et de capacité de recyclage.**

Dans le domaine du nucléaire où les installations sont conçues pour du très long terme (plusieurs dizaines d'années d'exploitation), certains composants tels que la cuve du réacteur ne peuvent pas être remplacés. Il s'avère donc nécessaire de développer une science prédictive du comportement des matériaux sur des temps longs.

Concernant les matériaux dédiés aux nouvelles technologies pour l'énergie, plusieurs axes d'amélioration sont explorés. Les matériaux de demain pour le photovoltaïque devront entre autres permettre d'augmenter le rendement des cellules photovoltaïques tout en abaissant leur coût.

Les enjeux des matériaux pour les nouvelles technologies de l'information et de la communication

Les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) se développent rapidement depuis la fin des années 90. Toujours plus petits, performants et intelligents, les composants de ces technologies nécessitent des nouveaux matériaux aux propriétés multiples et complémentaires.

L'enjeu est de miniaturiser les dispositifs tout en augmentant leurs performances et en multipliant les fonctions. Les structures complexes sont généralement réalisées à partir de motifs à l'échelle du nanomètre (1 nanomètre est égal à un milliardième de mètre, 1 000 fois plus fin qu'un cheveu) qui permettent d'associer des matériaux de nature différente pour allier leurs propriétés physiques.

Ces nouvelles avancées permettent aussi la création de matériaux comme des **textiles connectés** pour surveiller en temps réel les performances sportives ou bien des **textiles intelligents** qui peuvent transmettre des données et réagir en fonction des informations reçues. Par exemple, certains textiles réagissent à l'absence de lumière et s'illuminent.

Un matériau est de la matière remplissant une fonction. La plus élémentaire des classifications concerne donc la fonction. Quand un objet a pour fonction de transmettre des forces (comme un longeron de voiture ou les poutres constituant les charpentes), on qualifie les matériaux utilisés

de *matériaux de structure*. Quand la fonction de l'objet est de transmettre ou de stocker de l'information (sous forme de transport de courant, de lumière, de chaleur), on parle de *matériaux fonctionnels*. Pour simpliste qu'elle soit, cette classification est opérationnelle pour décrire l'évolution des matériaux : jusqu'au XX^e siècle, les matériaux avaient essentiellement des fonctions structurales, et c'était la maîtrise des propriétés mécaniques, la capacité de leur donner la forme requise, qui mesurait la performance technique d'une civilisation. Une bonne partie de ce qui va suivre concerne les matériaux de structure, car l'évolution historique s'étale sur une plus grande durée.

Les matériaux peuvent être opportunément classés en fonction de leur composition et de la nature des liaisons chimiques entre atomes. Ce n'est pas seulement une classification de physicien, c'est une classification d'ingénieur, car cette classification regroupe des matériaux aux propriétés voisines. On distingue les *matériaux organiques* et les *matériaux inorganiques*. Dans les matériaux organiques, et en particulier dans les polymères, le squelette carboné joue un rôle essentiel et les liaisons interchaînes sont relativement faibles. Les matériaux inorganiques correspondent au contraire à des liaisons interatomiques fortes. Suivant le rôle des électrons dans ces liaisons, on distingue les métaux dans lesquels les électrons se meuvent sans difficulté, et les céramiques dans lesquelles les électrons restent « attachés » aux atomes. Métaux, polymères et minéraux ont des propriétés d'usage assez différentes, comme conséquence de la nature diverse des liaisons entre atomes. Les métaux sont malléables, leurs propriétés sont très dépendantes de la température d'utilisation et des traitements thermomécaniques qu'ils ont subis ; ils conduisent bien la chaleur, l'électricité, et sont assez vulnérables à la corrosion. Les céramiques sont beaucoup plus rigides que les métaux et gardent leurs propriétés à haute température, mais elles sont fragiles, peu tolérantes au dommage, difficiles à déformer, et sont mises en forme par des procédés proches de la poterie, qui passent par des suspensions de particules suivies d'une consolidation. Les polymères sont beaucoup plus légers que les métaux et les céramiques, beaucoup moins rigides, leurs propriétés chutent très rapidement avec une température croissante, et ils sont très faciles à mettre en forme. Métaux, céramiques et polymères sont donc les grandes familles de base des matériaux. Le mélange de ces matériaux conduit à une nouvelle classe que sont les *composites*. Les matériaux organiques naturels sont des composites particulièrement bien adaptés à leurs fonctions, nous reviendrons sur ce point ultérieurement. Du point de vue de leur utilisation, la provenance des matériaux est aussi importante que leurs propriétés. Les métaux et les céramiques existent dans la nature sous de multiples formes. Les polymères existent dans les matières naturelles organiques, mais la plupart du temps sous une

forme composite – le caoutchouc naturel étant l'exception. Les polymères « artificiels » ne sont apparus que très tard dans le paysage, avec le développement de l'industrie pétrolière.

Les évolutions historiques

Examinons maintenant les évolutions historiques. Pour des raisons liées à nos connaissances limitées, le tableau que nous allons brosser est une vision fondamentalement occidentale de l'histoire, et sera essentiellement focalisé sur les matériaux de structure. Les historiens ont coutume de donner aux différents âges de l'humanité le nom des matériaux qui les ont dominés : l'âge de pierre, du cuivre, du bronze, du fer... On peut voir dans le XIX^e siècle l'âge de l'acier, dans le XX^e celui des polymères et ensuite du silicium. Cette habitude est révélatrice : les étapes successives de nos civilisations matérielles sont rendues possibles par le développement des matériaux et des ressources énergétiques.

Les matériaux utilisés par l'être humain ont évolué continûment, mais avec une rapidité extrêmement variable au cours de l'histoire, et une accélération considérable dans les dernières décennies. Aux temps préhistoriques, environ en 50 000 av. J.-C., les seuls matériaux utilisés par nos ancêtres étaient les matériaux naturels, qu'ils soient minéraux ou organiques. Le choix des matériaux était essentiellement limité par sa proximité. Un peu plus tard, disons autour de 50 av. J.-C., la variété des matériaux disponibles avait considérablement augmenté, les Romains avaient une excellente connaissance des céramiques, du verre, utilisaient la pierre mais aussi le mortier, et le travail des métaux – argent, or, étain, plomb, bronze et fer martelé – témoignait d'une bonne connaissance empirique de la métallurgie, moindre toutefois que celle rencontrée beaucoup plus tôt dans les civilisations extrême-orientales. Entre l'Empire romain et la fin du Moyen Âge, le monde des matériaux évolue relativement peu. Les ingénieurs du Moyen Âge ont appris à utiliser les matériaux de génie civil, comme le montrent les puissantes architectures religieuses, mais ils le font avec les matériaux du cru : le calcaire à Reims, la pierre volcanique à Clermont-Ferrand et le bois en Norvège. Le XIX^e siècle est sans aucun doute le siècle des métaux, en particulier des matériaux ferreux. Fontes et aciers permettent la construction de ponts, de navires, de trains, puis des voitures. La révolution industrielle est autant celle de l'acier que celle de la machine à vapeur. Alors que les métaux et les céramiques régnaient en maîtres, le XX^e siècle voit survenir deux révolutions. La première est provoquée par l'apparition des polymères artificiels fabriqués à partir du pétrole, avec la fascinante variabilité de leurs propriétés et la capacité de « construire » la matière au niveau atomique, en jouant sur l'arrangement des chaînes. La seconde révolution survient avec l'apparition en force des matériaux fonctionnels, en beaucoup moins grande quantité, mais présentant de très fortes

valeurs ajoutées. Alors que la révolution de l'énergie électrique avait été rendue possible grâce à des matériaux déjà existants, la révolution de la micro-électronique a nécessité la fabrication de silicium très pur. Quant à la révolution de la fibre optique, elle n'aurait pas pu avoir lieu sans la capacité de disposer de verres de très haute pureté avec un gradient d'indice.

L'innovation technologique : du matériau de rencontre au matériau sur mesure

L'évolution historique que nous venons d'esquisser traduit une évolution non seulement dans les matériaux disponibles, mais aussi dans la relation de l'homme aux matériaux, passant successivement du « matériau de rencontre » au « matériau optimisé », puis à la « compétition entre matériaux optimisés », et enfin à la « construction du matériau sur mesure ». Cette évolution traduit aussi le passage d'un savoir-faire à une science, puis à un ensemble de sciences, les *sciences de l'ingénieur*.

C'est bien d'innovation technologique qu'il s'agit. Aujourd'hui, nous sommes confrontés à ce qu'on a pu appeler « l'hyperchoix des matériaux ». Le nombre de matériaux disponibles pour l'ingénieur est d'environ 100 000. Les procédés pour les mettre en œuvre sont très variés. On découvre tous les jours de nouveaux matériaux, mais seul un nombre limité d'entre eux quitte le laboratoire : on utilise rarement un matériau pour une seule de ses propriétés, mais pour une combinaison d'entre elles, et pour ses possibilités de mise en œuvre. Et malgré la variété des matériaux disponibles, dans chaque domaine applicatif, un nombre limité de familles sont dominantes : dans le bâtiment, les verres, les aciers et les bétons ; dans l'automobile, les aciers, les alliages d'aluminium et les composites polymères ; dans la micro-électronique, le semi-conducteur largement dominant reste le silicium. Mais l'innovation est ici bien autre chose que l'allongement d'un catalogue d'options. Les trois piliers de la science des matériaux moderne, l'optimisation des matériaux, l'optimisation du choix entre matériaux, et enfin la conception de matériaux sur mesure, constituent une évolution profonde dans l'usage que nous faisons de la matière.

L'optimisation des matériaux, comme résultant d'une démarche scientifique, est relativement récente. Elle est née avec la métallurgie moderne dont les concepts fondateurs, les dislocations, la théorie des transformations de phase, datent des années 1930-1950. Quelques idées fondamentales doivent être retenues : quelle que soit l'importance de la liaison chimique, elle ne dit pas toute l'histoire et la microstructure ; l'arrangement des phases qui résulte de l'histoire vécue par le matériau est une composante essentielle dans la compréhension de son comportement. Les propriétés macroscopiques dépendent au moins autant des écarts à la périodicité du cristal parfait, et les défauts jouent un rôle essentiel dans ce comportement. Ces notions qui ont émergé de la

métallurgie ont ensuite diffusé dans l'étude des autres classes de matériaux, et progressivement la nécessité d'avoir une approche comparatiste a conduit à développer la science des matériaux, fille de la physique, de la chimie et de la mécanique, mais réductible à aucune d'entre elles ; point de rencontre entre les disciplines fondamentales et les sciences de l'ingénieur, la mécanique des structures, le génie des procédés, la conception.

C'est cette situation qui est ici le lieu de l'innovation technologique. La force motrice de l'innovation est l'évolution des exigences applicatives qui conduisent à demander aux matériaux de remplir conjointement des fonctions de plus en plus complexes, ce qu'on appelle la « multifonctionnalité ». Les stratégies de l'innovation qui ont mené au développement de matériaux à hautes performances impliquent de plus en plus la modélisation et la simulation numérique. Et enfin, la demande ultime de développer des matériaux sur mesure conduit à considérer des associations de matériaux et de géométries que l'observation des solutions naturelles peut inspirer.

Les stratégies de développement des matériaux à hautes performances

Le développement scientifique de matériaux à hautes performances a commencé avec la métallurgie physique. Certes, Benvenuto Cellini « savait » qu'en jetant son argenterie dans la fournaise où il tentait de couler son *Persée*, il améliorerait la coulabilité des bronzes, et les facteurs d'orgue « savaient » que l'ajout d'antimoine dans l'alliage étain-plomb des 32 pieds évitait qu'ils ne fluent sous leur propre poids. Mais la cause microstructurale de ces phénomènes ne fut découverte que bien plus tard. Les techniques expérimentales de caractérisation fine ainsi que les outils de modélisation et de simulation ont permis de comprendre et de maîtriser les mécanismes élémentaires. Cette connaissance fondamentale constitue en quelque sorte un ensemble de « briques élémentaires » pour construire des outils intégrés d'optimisation de la mise en œuvre des matériaux. C'est par une approche conjointe de l'expérimentation et de la modélisation qu'on développe aujourd'hui des alliages à hautes performances, sachant que la performance doit s'entendre à la fois comme une combinaison de propriétés intéressantes et comme une capacité de mise en œuvre opératoire (assemblage, traitements de surfaces, etc.). Mais un matériau « performant » doit aussi garder dans le temps sa performance. Il doit pouvoir résister aux agressions de la chimie, de la température, qui conduisent à une ruine d'autant plus sournoise qu'elle est différée. Cette durabilité des matériaux est un aspect essentiel de leur performance, mal compris car résultant souvent de phénomènes couplés (comme la corrosion sous contrainte). Cette résistance aux agressions est exacerbée dans les cas de « conditions extrêmes » qui résultent d'exigences de performance des systèmes au-delà des capacités des matériaux. La réponse à ces exigences peut passer par des

solutions de conception, comme le développement de circuits de refroidissement et de barrières thermiques pour les aubes de turbine de moteurs aéronautiques. Mais la compréhension du comportement des matériaux dans ces conditions extrêmes est parfois un passage obligé pour assurer un fonctionnement convenable, dans la durée, des dispositifs industriels. Le domaine des matériaux du nucléaire est un cas de condition extrême particulièrement exigeant puisque l'irradiation s'attaque aux trois piliers du comportement des matériaux : la chimie (par suite des transmutations), l'ordre cristallin (par suite des défauts d'irradiation) et le transport des espèces. Les développements espérés pour la maîtrise de la fusion contrôlée ne relèvent pas seulement du difficile problème de la stabilité des plasmas chauds confinés, mais aussi, et de façon limitante, du développement de matériaux susceptibles de résister à des irradiations par des neutrons de 13 MeV, à des températures de plusieurs centaines de degrés qui ne sont possibles que si l'extraction de chaleur peut se faire efficacement.

On voit bien que le développement de matériaux à hautes performances pour des cahiers des charges de plus en plus exigeants implique non seulement de développer des microstructures appropriées, de s'assurer de leur stabilité dans le temps, de leur robustesse vis-à-vis des procédés de mise en œuvre, mais aussi de la possibilité de répondre au cahier des charges par une stratégie « système » dont les traitements de surface sont un exemple. Le cas hyperbolique de conditions extrêmes, le développement de solutions technologiques pour la fusion contrôlée, relèvera certainement de cette approche conjointe matériau/système. Il n'est pas certain qu'on puisse y parvenir, mais il est évident que le matériau seul ne peut être une solution pour les dispositifs devant extraire la chaleur, confiner le champ et résister à l'irradiation. Ce que nous décrivons pour un cas exceptionnellement exigeant est vrai aussi dans des domaines plus courants comme la conception des matériaux pour la carrosserie automobile ou la canette de boisson pétillante : le temps de développement de matériaux indépendamment des conditions de mise en œuvre est décidément révolu, et de plus en plus, l'innovation technologique exige un rapprochement entre la science des matériaux et les sciences du design.

Le choix des matériaux

Ce lien nécessaire entre la science des matériaux et la conception industrielle est tout naturellement apparu avec l'hyperchoix des matériaux et la nécessité de développer des algorithmes de choix rationnel des matériaux et des procédés. Car cet hyperchoix induit aussi une compétition féroce : il suffit d'avoir à l'esprit la compétition entre les aciers, les alliages d'aluminium et les composites à matrice polymère pour la carrosserie automobile, entre les composites carbone-époxy et les alliages d'aluminium à hautes performances pour la voilure des

avions, ou plus prosaïquement, la variété des matériaux utilisés dans le conditionnement des boissons (verre, carton, acier, aluminium, plastiques). La compétition entre les matériaux et la variété des solutions possibles nécessitait des outils de comparaison objectifs, simples et efficaces permettant de réagir rapidement à l'évolution des cahiers des charges liée aux conditions techniques, économiques ou législatives. Cette problématique a été initiée dans les années 1990 à Cambridge par M. Ashby. Elle nécessitait à la base un état d'esprit « comparatiste ». Il a fallu tout d'abord développer des outils pour mesurer l'adéquation d'un matériau avec les éléments d'un cahier des charges, les « indices de performance ». Ensuite, il a fallu développer l'équivalent pour le choix des procédés avec un outil simple d'estimation des coûts. Les problèmes associés au couplage entre les matériaux, les formes et les procédés, ont nécessité le développement de stratégies inspirées des systèmes experts. Les questions de choix multicritères, multi-astreintes ou multi-objectifs, ont fait appel à toutes les techniques d'analyse de la valeur, au concept de front de Pareto, et parfois, à des techniques d'intelligence artificielle comme la logique floue (*fuzzy logic*). Les dix dernières années ont vu émerger des méthodes de choix qui sont actuellement en usage dans de multiples secteurs industriels. Le caractère opérationnel de ces méthodes est lié à leur mise en œuvre sous forme de logiciels, avec des bases de données « matériaux » ou « procédés » structurées et hiérarchisées en familles et sous-familles. Les outils développés dans le domaine public ne sont que la partie émergée de l'iceberg : toutes les grandes entreprises à forte compétence technologique dans les matériaux, qu'ils les produisent ou les utilisent, ont leurs outils propres, qui sont aussi bien un outil d'archivage de l'expertise, une méthode de formation des ingénieurs et un guide de veille technologique concurrentielle. Mais le cœur de l'enseignement qui émerge de ce travail est que la comparaison entre matériaux doit être effectuée le plus tôt possible dans la procédure de conception. Jamais on ne concevra une roue en aluminium moulé comme on conçoit une roue en acier roulé soudé, et on ne peut bénéficier des avantages des matériaux composites dans le vélo que si l'on oublie le sacro-saint cadre en structure diamant très adapté aux structures tubulaires métalliques. La procédure systématique de choix des matériaux, aidée par les logiciels faisant usage de bases de données structurées, nécessite une analyse fonctionnelle poussée du composant concerné. Et enfin elle doit être, par sa nature même, itérative et hiérarchisée.

Les problèmes liés au respect de l'environnement se sont invités dans les questions de conception avec toute la subtilité qu'on connaît aux effets de mode : au premier rang ! L'écoconception doit être traitée avec méthode et rigueur. Même en se limitant aux simples questions de l'impact énergétique et de l'impact sur les émissions de dioxyde de carbone, il est impératif de bien comprendre que l'écobilan doit porter sur l'objet industriel et non sur le

matériau, et que les bilans énergétiques ou chimiques doivent très clairement distinguer les phases de fabrication et les phases de fonctionnement de l'objet. C'est le passage obligé pour avoir une approche rationnelle de l'écoconception. Un cas particulièrement riche de telles problématiques est celui de la maîtrise thermique du bâtiment, qu'il s'agisse du développement d'isolants à hautes performances, ou de la mise en œuvre de dispositifs contribuant à lisser le pic de consommation électrique en début de soirée. Ces deux questions sont, fondamentalement, des défis pour la science des matériaux. Mais à l'autre extrême de la dualité matière/énergie se situe la question de la réutilisation des matériaux, du recyclage. Là encore il importe d'avoir une vision globale : on n'a efficacement recyclé les aciers de l'automobile que lorsqu'on a intégré les circuits électriques de façon à retirer facilement les fils de cuivre qui causaient des défauts de laminage dans les aciers recyclés ; et la tension sur les terres rares, qui inquiète beaucoup la presse, trouverait peut-être en partie sa solution dans l'utilisation de la « mine urbaine » que constituent les aimants déjà en place dans nos moteurs électriques.

Des matériaux architecturés aux matériaux bio-inspirés

Les cahiers des charges de plus en plus exigeants conduisent à des requêtes qui sont physiquement contradictoires pour les matériaux : avoir une haute limite d'élasticité et une forte déformabilité, avoir une forte conductivité thermique associée à une grande inertie, présenter un très bon comportement à très haute température et une grande tolérance au dommage et à la propagation de fissures préexistantes. Ces contradictions intrinsèques peuvent être évitées grâce à une stratégie connue sous le nom de *matériaux architecturés*. Ces matériaux consistent en une association d'un ou de plusieurs matériaux, dont la géométrie contrôlée permet de distribuer la matière et les propriétés sur des échelles de longueur comparables aux dimensions du composant. Si le nom de *matériaux architecturés* et la démarche consistant à développer cette stratégie de contournement des contradictions sont innovants, les exemples de telles solutions sont nombreux : les câbles associent rigidité axiale et flexibilité ; les structures sandwiches associent légèreté et rigidité flexurale ; les multicouches polymères métal utilisés comme emballage des isolants sous vide associent tenue à la perforation, étanchéité et faible conductivité thermique ; les matériaux autobloquants réalisés en céramiques associent tolérance au dommage et tenue à chaud. Les stratégies décrites ci-dessus s'appuient sur la maîtrise des géométries, mais on peut aussi jouer sur les gradients de microstructures, comme les traitements de surface, les gradients de composition.

Sources : techniques de l'ingénieur, différents sources documentaires.