

Matériaux sur mesure dans les structures

Yves Bréchet

LTPCM, Institut National Polytechnique de Grenoble, Saint Martin d'Hères

La science des matériaux de structure vit depuis deux décennies une évolution profonde. Intégrant la compréhension de la genèse des microstructures et des relations entre microstructures et propriétés mécaniques, s'appuyant sur un développement inédit de la modélisation et de méthodes expérimentales de pointe, on s'approche maintenant du stade de conception de « matériaux sur mesure ». Ceci permettra de répondre à des cahiers des charges complexes, en jouant non seulement sur la microstructure, mais également sur les architectures et sur les associations de matériaux, donnant naissance à une nouvelle classe de solutions aux problèmes de l'ingénieur : les « matériaux hybrides ».

Matière et matériaux, matériaux de structure et matériaux fonctionnels

Un matériau est de la matière qui doit remplir une fonction. Chaque époque de civilisation ajoute au capital de matériaux disponibles et nous utilisons toujours la pierre ou les aciers... Depuis que l'homme s'exerce à maîtriser son environnement, il s'est efforcé d'utiliser les matériaux disponibles (le silex, le bois, les métaux précieux à l'état natif), puis de développer de nouveaux matériaux (le bronze, les aciers, les alliages d'aluminium, plus récemment les polymères). Il les a mis en forme, il les a assemblés, les a protégés des agressions chimiques de façon à réaliser les outils, les objets qui lui permettaient de vivre. Ils lui sont devenus si familiers qu'il faut quelque effort d'imagination pour se convaincre de la quantité des savoirs intégrés dans la réalisation d'un paquet de « chips » (12 couches micrométriques empilées !), d'une boîte de boisson (d'une épaisseur inférieure à 100 μm) ou d'un pneumatique (dont le renfort métallique atteint des résistances mécaniques inégalées à ce jour). Sans aller chercher les produits des industries de la microélectronique, il n'est que de regarder avec un peu de curiosité les objets du quotidien, la portière de voiture, l'aile d'avion, la lame du rasoir, pour réaliser que là aussi, et sur des tonnages combien plus conséquents, l'ingéniosité humaine a fait son œuvre et est loin de l'avoir achevée.

Un matériau est donc de la matière qui doit remplir une fonction. Mais quelle fonction ? Cette fonction peut être de transmettre des efforts, on parle alors de « matériaux de structure ». Elle peut être de transmettre de l'information ou de l'énergie, on parle alors de « matériaux fonctionnels ». Disons tout d'abord que la distinction n'est pas aussi tranchée qu'il y paraît... Les matériaux fonctionnels doivent souvent présenter une tenue mécanique suffisante, par exemple dans le cas d'un aimant tournant dans un moteur qui doit supporter les forces centrifuges, ou dans le cas des interconnexions de cuivre dans les circuits électroniques qui ne doivent pas s'endommager au cours de l'élaboration, ni en cours de fonctionnement. Inversement, les matériaux de structure doivent de plus en plus intégrer des aspects fonctionnels : les aubes de turbine aéronautiques doivent être associées à des barrières thermiques pour ne pas excéder leur température maximale de fonctionnement, bien inférieure à celle de l'environnement gazeux qui les entoure ; les boîtiers d'ordinateur doivent à la fois jouer un rôle de protection mécanique, mais aussi d'écran électromagnétique ; certains composites à base polymère et renfort fibreux intègrent des fibres optiques pour assurer le suivi du dommage. Les matériaux modernes tendent à devenir « multifonctionnels », même si leur objet premier permet en général de les classer en « matériaux de structure » et en « matériaux fonctionnels ». Nous allons dans cet article nous intéresser plutôt aux « matériaux de structure ».

Les propriétés des matériaux de structure : élasticité, plasticité, rupture

Les matériaux de structure doivent transmettre des efforts. Il importe donc de comprendre leur réponse à une force appliquée.

Quand on s'essaie à fléchir une barre de métal, on constate tout d'abord qu'elle se déforme de façon réversible : une fois la force ôtée, la barre revient à sa forme initiale, la déformation est dite « élastique ». Le rapport entre la force appliquée et la déformation observée caractérise la rigidité de la barre. Elle dépend à la fois de la forme de la section (une poutre en I sera plus rigide qu'une poutre carrée, pour une section de surface identique) et du matériau qui la constitue. La rigidité intrinsèque du matériau est caractérisée par un coefficient d'élasticité appelé « module d'Young ». La déformation élastique est liée à des déplacements réversibles des atomes constituant les matériaux autour de leurs positions d'équilibre. Pour les polymères, la situation est un peu plus complexe, puisque l'on doit considérer à la fois la géométrie des chaînes et leurs interactions : c'est l'élasticité d'une pelote de fil de pêche qui importe, bien inférieure à celle du fil de pêche tendu... Le module d'élasticité est donc lié à la fois à la raideur des liaisons interatomiques et à la densité de liaisons : c'est pour cela que les matériaux à haut point de fusion ont en général des modules d'élasticité élevés, et que les mousses ont des modules d'élasticité faibles. La nature des liaisons interatomiques permet de classer les différents matériaux : quand la cohésion est principalement liée au gaz électronique, on a affaire à des métaux ; quand la liaison est majoritairement ionique ou covalente, on a affaire à des céramiques ; dans les polymères non étirés, ce sont les liaisons de type Van der Waals ou hydrogène qui l'emportent. Ce regrou-

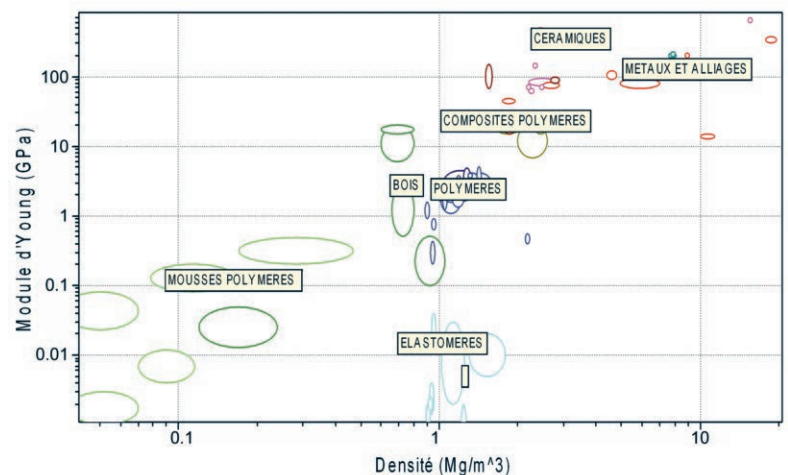


Figure 1 : Module d'Young en fonction de la densité. Les grandes familles de matériaux sont représentées par les « bulles ». Le module très élevé des céramiques est lié à la liaison forte ionique ou covalente, qui assure leur cohésion. Pour des cartes plus détaillées, voir la référence [3].

pement en familles apparaît clairement dans les cartes de propriétés (figure 1).

Si on fait encore un effort, on peut déformer la barre de façon irréversible : elle reste tordue, même si on cesse d'appliquer la force ; la déformation est dite « plastique ». La plasticité ne se produit que pour des contraintes excédant une grandeur du matériau appelée « **limite d'élasticité** ». Alors que l'ensemble des atomes intervenait dans la déformation élastique, ce sont essentiellement les défauts du matériau qui contrôlent sa plasticité. Ces défauts, linéaires, occupent une fraction infime du matériau ; ils glissent suivant des plans cristallographiques, et un matériau cristallin se déforme en quelque sorte comme un « paquet de cartes », par glissement des plans cristallographiques denses les uns par rapport aux autres. Ce glissement ne peut se produire que si la force agissant sur les défauts linéaires (appelés « dislocations ») excède une valeur critique : c'est le sens de la « limite d'élasticité ». Comme la plupart des atomes n'ont pas été touchés par la déformation plastique, le module d'élasticité du matériau reste identique, que le matériau ait été déformé plastiquement ou non. Dans des matériaux tels que les céramiques, le mouvement des dislocations est très difficile : la contrainte à rupture est élevée, mais la déformation à rupture est faible. Dans la plupart des matériaux métalliques, le mouvement des dislocations est relativement aisé, aussi leur déformation à rupture sera substantielle. Les polymères encore une fois se singularisent : il est probable que leur déformation mette en jeu des migrations de défauts, et que le degré de réalignement des chaînes polymériques joue aussi un rôle (figure 2).

Si on insiste encore, on peut conduire la barre à la rupture, et cela pour une contrainte critique (« limite à rupture ») correspondant à une déformation critique (« ductilité »). D'expérience, nous savons que si on introduit une entaille dans la barre, la rupture en sera rendue plus facile : c'est une autre caractéristique des matériaux de structure, leur résistance à l'entaille, que l'on caractérise par leur « **ténacité** ». Cette ténacité traduit la compétition entre le relâchement d'énergie élastique (qui pour une contrainte donnée varie comme l'inverse du module) et la dissipation d'énergie liée à la propagation de l'entaille. Cette dissipation d'énergie provient à la fois de l'énergie pour créer des surfaces « fraîches » (en rompant des liaisons interatomiques), mais surtout de la dissipation d'énergie liée à la déformation plastique irréversible en tête de fissure. Plus un matériau se déforme plastiquement aisément, plus la propagation de la fissure nécessi-

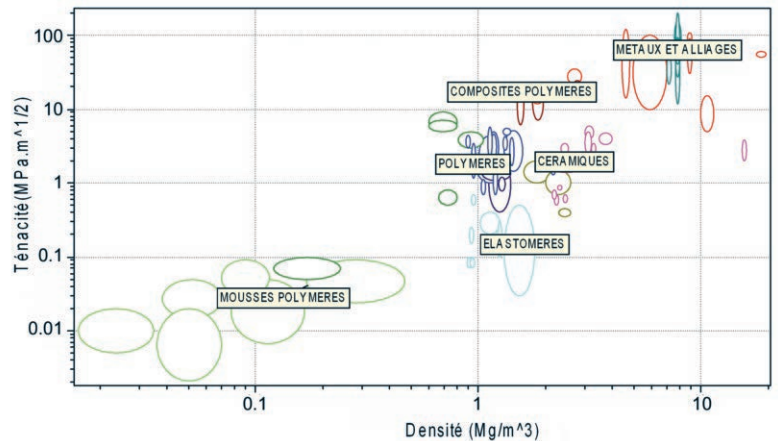


Figure 3 : Ténacité en fonction de la densité. La ténacité a la dimension du produit d'une contrainte par une racine carrée d'une longueur. Remarquez la ténacité désastreuse des céramiques, qui est leur « talon d'Achille » pour les applications structurales.

tera de dissipation d'énergie. Les céramiques ont une faible ténacité, car la déformation plastique leur est difficile. Les polymères ont une faible ténacité, car le module d'élasticité est faible. Les métaux et alliages réalisent un bon compromis, ayant à la fois un module d'élasticité important et une plasticité facile (figure 3).

Élasticité, plasticité et ténacité sont donc trois caractéristiques du comportement des matériaux. La première caractérise la rigidité intrinsèque, la deuxième la déformabilité, la troisième la tolérance au défaut (directement liée à la ténacité).

En première approximation, ces trois grandeurs permettent de décrire les exigences d'un cahier des charges pour une structure. Une portière de voiture doit être emboutie pour prendre la forme voulue : il lui faudra une grande capacité à la déformation plastique, et donc une limite d'élasticité faible. Le longeron au contraire doit demeurer rigide élastiquement et ne pas se déformer plastiquement, il faudra que sa limite d'élasticité soit élevée. Dans chaque cas il faudra que la présence d'un défaut ne conduise pas à une rupture brutale : une bonne ténacité sera exigée.

Les matériaux sur mesure

Le problème du concepteur est qu'il demande non pas une propriété, mais un ensemble de propriétés, avec des exigences souvent contradictoires. Par exemple, une limite d'élasticité élevée est souvent associée à une ténacité faible.

Concevoir avec les matériaux de structure est souvent un exercice de compromis. Remplir un cahier des charges multicritère avec un maximum d'efficacité (et souvent à moindre coût...) requiert une comparaison objective entre les 80000 matériaux disponibles pour l'ingénieur. Des méthodes systématiques utilisant des bases de données structurées et des outils d'exploration informatiques poussés ont vu le jour ces dernières années pour guider la démarche du concepteur. Elles permettent de tirer parti de l'existant, de choisir la meilleure combinaison « matériau, forme, procédé » pour réaliser un composant de structure.

Mais le véritable défi aujourd'hui est tout autre : il faut certes faire le meilleur choix de matériaux, mais il faut aussi développer de façon méthodique des matériaux « sur mesure » pour des cahiers des charges « multicritères » comprenant aussi des exigences de mise en œuvre (formabilité, assemblage...). Combien de découvertes restent à l'état de « matière » sans jamais atteindre pleinement celui de « matériau », faute de cette prise en compte du caractère nécessairement complexe d'un cahier des

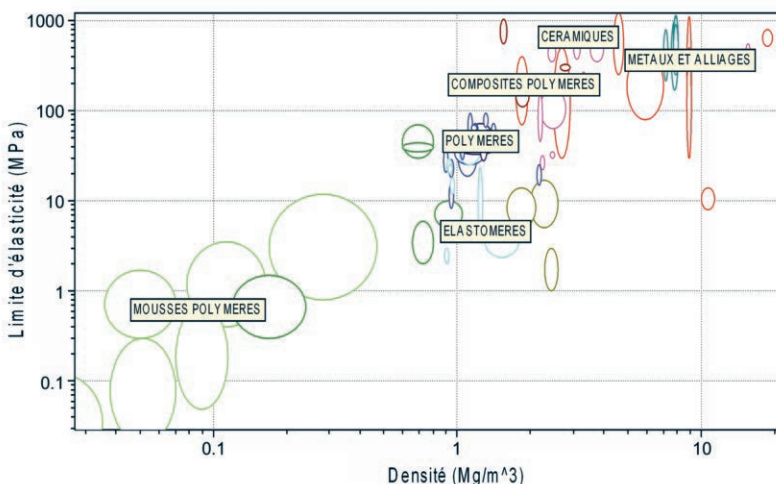


Figure 2 : Limite d'élasticité en fonction de la densité. Notez la grande variabilité de la limite d'élasticité des métaux, liée à la très forte dépendance avec la microstructure interne du matériau.

charges réaliste ? La difficulté majeure du développement de matériaux « sur mesure » est double : comment contourner les limites intrinsèques aux propriétés ? Comment combiner des propriétés contradictoires ?

On peut imaginer plusieurs stratégies pour développer des matériaux sur mesure, c'est-à-dire présentant un portefeuille de propriétés attractif pour une application donnée : on peut jouer soit sur la microstructure, soit sur la forme, mais on peut aussi développer des associations de matériaux ou « matériaux hybrides ».

Matériaux sur mesure : jouer sur la microstructure

La stratégie la plus classique est de développer la microstructure du matériau pour obtenir un ensemble de propriétés requises. Par microstructure, nous entendons les phases constitutives du matériau, mais aussi leurs échelles. C'est cette démarche qui est la plus naturelle pour le physicien des matériaux, qu'il soit polymériste, céramiste ou métallurgiste. Elle repose à la fois sur une bonne connaissance des relations entre les paramètres d'un procédé d'élaboration et les microstructures qui en résultent, et sur une compréhension approfondie des relations entre les microstructures et les propriétés. Par exemple, c'est une telle démarche qui sous-tend le développement des aciers « TRIP » qui présentent une combinaison très intéressante pour la carrosserie automobile (figure 4). C'est un beau cas, où la métallurgie permet de contourner une des antinomies classiques des matériaux : une limite d'élasticité élevée est en général associée à une formabilité médiocre. Le principe des aciers « TRIP » est de présenter un mélange de deux phases du fer, la ferrite (de structure cubique centrée, stable) et l'austénite (de structure cubique à faces centrées, métastable). Au début de la déformation, le matériau est « mou » et progressivement, sous contrainte l'austénite se transforme en ferrite (martensite) plus dure. Le matériau se durcit considérablement au fur et à mesure qu'on le déforme, ce qui évite les problèmes de localisation spatiale de la plasticité : le matériau conserve une bonne formabilité et, en fin de course, il possède une limite d'élasticité élevée. Cette astuce n'est possible qu'à condition de faire subir au matériau un traitement thermomécanique complexe qui conduit à la coexistence de l'austénite et de la ferrite avec les bonnes morphologies. Concevoir *a priori* ce traitement thermique optimisé n'est pas chose évidente : il faut être capable de prédire, pour une température et un temps donnés, la fraction d'austénite transformée en ferrite, la composition de l'austénite résiduelle, son degré de métastabilité... Cela soulève des questions de fond non encore résolues, même si leur énonciation semble simple. Par exemple, un acier comprend de multiples éléments chimiques, substitutionnels et interstitiels, ces derniers diffusant beaucoup plus rapidement. Leur solubilité est différente dans les deux phases du fer. La diffusion des éléments d'alliage lors des traitements thermiques est souvent le phénomène limitant la cinétique de réaction. Le problème est relativement simple dans un alliage binaire, Fe-Ni par exemple : si on suppose que la concentration à l'interface est donnée par les concentrations d'équilibre du diagramme de phase, le problème est « bien posé ». Quand l'alliage est ternaire, la situation est plus complexe : les équations de diffusion des deux espèces et les bilans de masse à l'interface doivent être simultanément vérifiés, ce qui sélectionne les conditions d'opération entre toutes les solutions possibles (données par les conodes* du diagramme ternaire). Mais la différence de plusieurs ordres de grandeur entre les différents coefficients de diffusion rend la situation plus complexe encore ; la cinétique correspondant à une par-

tion des éléments substitutionnels est extrêmement lente (malgré son avantage du point de vue thermodynamique) : le système « choisit » des conditions d'interface différentes qui autorisent une non-partition des éléments diffusant lentement, et une cinétique plusieurs ordres de grandeur plus rapide. Le critère de sélection de ces conditions d'interface, et de leur évolution au cours de la réaction, est à la fois un beau problème non résolu de couplage entre la thermodynamique et la cinétique, et une question d'importance centrale du point de vue industriel pour l'optimisation des traitements thermiques.

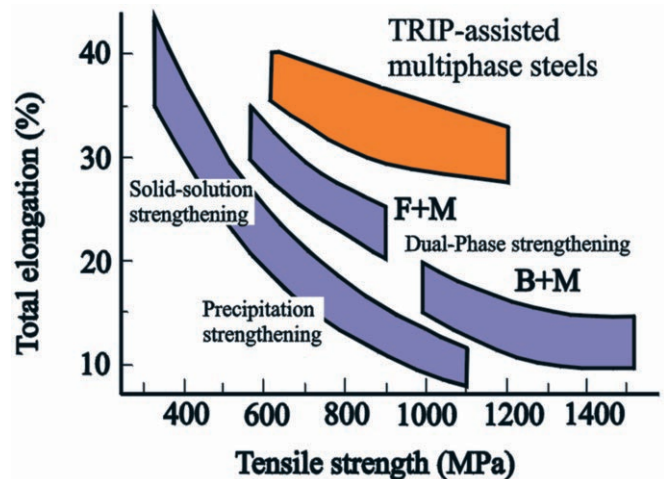


Figure 4 : Les aciers pour la tôlerie automobile : recherche du compromis entre résistance (résistance mécanique en traction en MPa en abscisse) et formabilité (déformation à rupture en ordonnée). Les zones en violet indiquent les aciers classiques renforcés par solution solide, précipitation ou structure duplex. La zone en orange indique les aciers « TRIP ». F signifie « ferrite », M « martensite » et B « bainite », trois microstructures différentes dans les aciers. (P. Jacques, UCL Louvain La Neuve.)

Les composites fournissent depuis longtemps des exemples de « matériaux sur mesure ». Les composites tissés à matrice polymère et à fibre de renfort sont l'exemple le plus simple : ils permettent d'obtenir des matériaux à propriétés mécaniques exceptionnelles et à anisotropie contrôlée. Le choix de la matrice, du renfort, de l'architecture et du procédé d'élaboration permet de développer des matériaux qui peuvent entrer en concurrence avec les alliages légers les plus performants. Un degré de liberté supplémentaire est maintenant mis en œuvre : l'échelle. Quand le renfort est de taille nanométrique, sa fraction volumique effective agissant comme renfort est considérablement augmentée, pour cause de modifications de comportement des chaînes polymères au voisinage des interfaces. C'est l'origine des élastomères à renfort de silice utilisés dans le « pneu vert » dont les gommages ont des propriétés de dissipation d'énergie exceptionnelles. Des études récentes sur des composites à renfort nanostructurés à fort facteur d'aspect (rapport longueur/diamètre d'une fibre) montrent qu'on peut avoir des effets spectaculaires avec des fractions de renfort très faibles (quelques %) par « percolation mécanique de l'arbre de renfort ». Là encore, ces matériaux peuvent être fabriqués « sur mesure » : on peut leur conférer des propriétés de conduction électrique en leur alliant des particules de noir de carbone.

Matériaux sur mesure : jouer avec les formes

Pour concevoir une structure, il convient de garder à l'esprit que la fonction est remplie par un composant (c'est-à-dire une forme appropriée) et non par un matériau seul, et que la forme donnée à la matière peut aussi contribuer à la fonction. Une tôle ondulée a une rigidité accrue dans une flexion autour d'un axe perpendicu-

* Segments de droite joignant les points représentatifs des compositions des deux phases d'un domaine biphasé dans une coupe isotherme d'un diagramme de phases ternaire.

laire à la direction des ondulations ; un câble est rigide en traction, mais il est peu rigide en flexion. On peut ainsi s'inspirer du raisonnement qu'aurait le mécanicien de bureau d'étude : puisque la solidité est demandée au composant, et non au matériau constitutif, on peut obtenir cette solidité en modifiant la forme de la section de façon à augmenter son moment d'inertie en flexion. Cette solution au niveau « macroscopique » peut inspirer la conception de matériaux nouveaux. Prenons l'exemple des matériaux cellulaires ou mousses solides. De tels matériaux existent à partir de tous les matériaux massifs, polymères, métaux ou céramiques. On peut montrer que dans le cas de mousses ouvertes, le module d'élasticité du matériau cellulaire varie comme le carré de la densité. Cette variation vient du fait que les « poutres » de la structure cellulaire sont sollicitées en flexion, ce qui est un mode relativement « mou ». Si les poutres ont une connectivité suffisante (critère de Maxwell), elles sont sollicitées en traction et la loi d'échelle est modifiée : le module varie comme la densité du matériau cellulaire. C'est d'ailleurs le principe des treillis de poutres utilisés dans le génie civil. On peut donc concevoir des matériaux cellulaires « sur mesure » beaucoup plus efficaces, en réalisant un treillis de poutres à l'échelle millimétrique (par prototypage rapide), puis en déposant un métal sur ce substrat.

Donnons un autre exemple de matériau cellulaire développé sur mesure : il s'agit d'un absorbant acoustique pour les réacteurs d'avion : pour absorber le son, il faut dissiper l'énergie d'une onde acoustique. Elle doit donc pénétrer le matériau absorbant qui doit donc avoir une porosité ouverte. Mais les propriétés de résistance mécanique sont meilleures, à densité équivalente, pour un matériau à porosité fermée. On peut concevoir un matériau formé de billes creuses (de rayon millimétrique) d'alliage de nickel convenablement frittées. La géométrie externe de l'empilement peut être optimisée pour maximiser l'absorption d'un spectre de bruit donné, la géométrie interne (cols de frittage, épaisseur des parois) peut être optimisée pour assurer une rigidité et une solidité convenables à masse minimale, le choix de l'alliage de nickel peut être effectué pour optimiser la tenue au fluage (c'est-à-dire la résistance à la déformation au cours du temps observée dans les matériaux sous charge à haute température), le traitement de surface peut être choisi pour assurer la résistance à l'oxydation à chaud. Voilà un exemple de matériau cellulaire entièrement conçu « sur mesure » pour répondre à un cahier des charges donné (figure 5). Une fois encore, réaliser un matériau sur mesure ne peut se satisfaire d'une simple procédure « essai-erreur ». Dans le cas précédemment cité, une modélisation prédictive des propriétés acoustiques d'un matériau poreux régulier, s'appuyant sur la théorie de l'homogénéisation périodique, a été développée pour optimiser la géométrie en fonction du spectre à absorber. Un calcul par éléments finis des propriétés élastiques de la structure et de ses seuils de plasticité a permis de proposer des relations entre les propriétés du matériau constitutif et les caractéristiques géométriques de l'empilement, et des contraintes limites que lui autorise le cahier des charges. Enfin, des outils d'optimisation multicritère sur de vastes bases de données de matériaux ont permis de guider le choix optimal du matériau constitutif.

Les solutions hybrides

La conception d'un matériau « sur mesure » répond en général à un cahier des charges hautement contradictoire qui rendrait impossible sa réalisation par un matériau existant. Si tel est le cas, il faut se donner toute la richesse de la conception, en alliant à la fois l'optimisation (via la microstructure) de matériaux des grandes classes (métaux, céramiques ou polymères), la possibilité de combiner différents matériaux, et de le faire dans des géométries contrôlées. C'est ce qu'on appelle des « matériaux hybrides », en quelque sorte un stade inter-

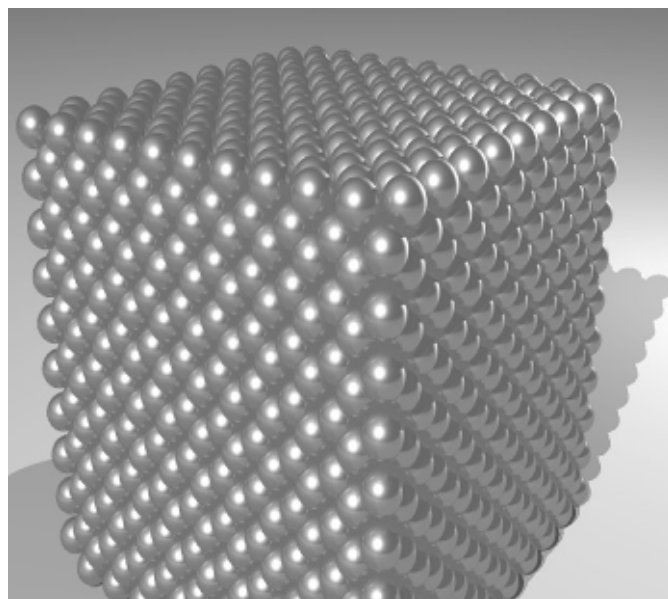


Figure 5 : Exemple d'un absorbant acoustique conçu « sur mesure ». Les billes creuses font quelques millimètres de rayon et quelques centaines de micron d'épaisseur.

médiaire entre le matériau « classique » et la structure proprement dite. L'exemple prototype de telles solutions est le câble de connexion électrique qui doit évidemment conduire l'électricité, et isoler l'utilisateur de l'électricité. Aucun matériau ne peut réaliser cette double exigence ; c'est un métal qui assurera la conduction, et un polymère qui assurera l'isolation : on doit nécessairement combiner deux matériaux, dans une géométrie bien précise. Il faut de plus avoir une structure flexible, ce qui impose de fragmenter le conducteur électrique sous forme des fils d'un câble. Cet exemple simple a toutes les caractéristiques des matériaux hybrides : résoudre un cahier des charges contradictoire, par l'assemblage avec une géométrie contrôlée de matériaux dissimilaires remplissant partie du cahier des charges.

Ces solutions hybrides conduisent souvent à marier la carpe et le lapin, et toute une ingénierie des assemblages hétéromatériaux doit alors être mise en place pour réaliser ces « nouveaux matériaux ». On a vu au cours des dernières années se développer les tôles sandwich acier/élastomère, l'acier assurant la rigidité et l'élastomère l'absorption des vibrations, des tôles aluminium/polymères pour l'allègement des structures (le « GLARE »). On envisage des développements de boîtes d'absorption de chocs derrière les pare-chocs avec des structures tubulaires renforcées par des mousses métalliques. Il s'agit de développer maintenant une approche systématique permettant d'intégrer des « solutions hybrides élémentaires » (câbles, sandwichs, raidisseurs, treillis...) avec des bases de matériaux divers pour permettre de générer de nouvelles solutions hybrides en fonction des contradictions des cahiers des charges, compte tenu des incompatibilités intrinsèques qui rendent impossibles les solutions « monomatériaux ».

Une mine de solutions hybrides se trouve dans les « matériaux de structure biologiques ». La nature doit fonctionner à relativement basse température, ce qui limite les matériaux dont elle dispose : essentiellement ceux issus de la chimie des solutions ioniques et les polymères. La nature doit faire croître de façon adaptative des structures : c'est pour cette raison que les structures fibreuses et lamellaires y sont si fréquentes. La richesse des matériaux de structure biologique, le bois, les os, les os, les coquillages, vient de la variété des architectures : elle joue au mieux avec la multiplicité des interfaces et avec une structuration à toutes les échelles. C'est ainsi que la nature peut développer des matériaux à la fois durs et tenaces

en empilant une structure lamellaire de céramique et de polymères (la coquille d'huître). C'est ainsi qu'elle peut développer suivant le besoin, et avec les mêmes ingrédients, en jouant simplement sur l'enroulement fibreux, des bois très souples ou très rigides. Il y a fort à parier qu'une meilleure compréhension du comportement des matériaux naturels, parce qu'ils reflètent à l'extrême les problèmes posés par un nombre limité de matériaux, pourra apporter une source d'inspiration dans la conception de solutions hybrides... Reste à trouver les procédés pour les réaliser !

Que reste-t-il à trouver ?

D'en être arrivé à la conception de « matériaux sur mesure » ne signifie en aucune manière qu'on est passé de l'étape de compréhension à l'étape de développement, et qu'il n'y aurait « plus rien à comprendre ». Le développement de « matériaux sur mesure » s'appuie nécessairement sur une compréhension fondamentale qui est encore à ce jour incomplète. Développer « un alliage sur mesure » suppose de savoir prédire l'évolution des microstructures au cours de traitements thermomécaniques. Ceci suppose une compréhension profonde des couplages entre la thermodynamique et les transformations de phases, qui n'est qu'imparfaitement acquise. Il faut aussi expliciter des relations entre la microstructure et les propriétés mécaniques que nous n'avons guère que pour la limite d'élasticité. L'effet de la réduction des échelles de la microstructure, les limites à attendre quant à son incidence sur les propriétés, sont des questions encore ouvertes. Développer un solide cellulaire sur mesure suppose une connaissance des processus d'élaboration qui n'est à ce jour que parcellaire : quel est le rôle de la germination des bulles ? Quel est celui du drainage du liquide hors des parois ? Développer un composite optimisé n'est correctement fait que pour les composites réguliers, le champ entier des matériaux enchevêtrés reste à développer. Le développement systématique de solutions hybrides nécessitera à la fois de marier l'approche du mécanicien avec un traitement de concepteur du cahier des charges, et des outils d'exploration des différentes solutions semblables à ceux développés pour la comparaison des matériaux. Elle nécessitera aussi une « taxonomie intelligente » qui devra intégrer la compréhension des arrangements rencontrés dans les structures naturelles. Le développement de matériaux « sur mesure » exige un développement parallèle de la compréhension et de la modélisation des mécanismes à la base du comportement mécanique, qu'ils concernent le volume ou les surfaces.

Une autre erreur est de laisser croire que la voie des « matériaux sur mesure » est la seule méritant d'être explorée. Ce serait compter sans les surprises que nous réserve la science des matériaux, la découverte des « nouveaux matériaux », des amorphes, des nanocristallisés, des nanotubes de carbone, des quasicristaux pour n'en citer que quelques-uns pour lesquels on a envisagé de tirer parti de leurs propriétés mécaniques. Bien imprudent serait celui qui assurerait que ces voies ne peuvent pas aussi conduire, en sus de leur intérêt fondamental propre, à des applications possibles, fut-ce sous forme de niche. À qui prétendrait décider de la pertinence d'une recherche de base dans les matériaux, on pourrait rappeler que la refusion de zone qui a permis d'obtenir des matériaux de haute pureté, passage obligé pour toute l'industrie de la microélectronique, a été découverte par un chercheur désireux purifier un métal pour en étudier les propriétés mécaniques, d'un point de vue purement fondamental...

Conclusion

La réflexion sur les matériaux de structure est d'autant plus nécessaire que les ressources en matière aussi bien qu'en énergie ne sont pas illimitées : il va falloir construire des véhicules plus légers, concevoir des emballages plus faciles à

recycler, optimiser des structures sans se reposer sur des facteurs de sécurité qui conduisent à surconsommer de la matière. Il va falloir, pour les objets de notre confort quotidien, utiliser mieux les matériaux, les combiner, les faire évoluer, les adapter à l'application recherchée. Le temps est révolu où l'on pouvait se contenter du tout venant ; les conceptions du futur, de plus en plus devront « choisir au mieux » les matériaux. Les matériaux du futur devront remplir des cahiers des charges multicritères complexes. On peut penser que d'autres découvertes inopinées de nouveaux matériaux modifieront le paysage, mais une démarche systématique de développement de matériaux en vue d'un profil recherché est certainement une voie à explorer. Cette évolution de la recherche sur les matériaux vers une conception optimisée et un développement sur mesure est un nouveau défi qui ne pourra être relevé par une progression en aveugle : c'est par la compréhension des mécanismes contrôlant les propriétés, par la modélisation préalable des propriétés attendues avant de développer le matériau, par une utilisation systématique des possibilités offertes par la combinaison des différentes classes de matériaux et par la prise en compte des potentialités offertes par la variété des formes, que le domaine des « matériaux de structure » sera en état de répondre à ces nouvelles exigences.

Pour en savoir plus...

- Sur les matériaux
- [1] M. Ashby, D.R.H. Jones, *Les matériaux*, Vol. 1 et 2, Dunod, Paris (2000).
- Sur les transformations de phase
- [2] M. Hillert, *Thermodynamics and phase equilibria*, Cambridge University Press (2000).
- Sur les problèmes de conception
- [3] M.F. Ashby, Y. Bréchet, L. Salvo, *Choix des matériaux et de leur mise en œuvre*, Presses Universitaires Romandes (2001).
- Sur les problèmes de conditions d'interfaces dans les alliages ternaires
- [4] C. Hutchinson, A. Fuchsmann, Y. Bréchet, "Diffusional formation of ferrite from austenite in Fe-C-Ni alloys", *Metallurgical Transactions A* **35**, 1211 (2004).
- Sur les « matériaux sur mesure »
- [5] M. Ashby, Y. Bréchet, "Designing Hybrid Materials", *Acta Materialia* **51**, 5801 (2003).
- [6] S. Gasser, Y. Bréchet, F. Paun, "Materials design for acoustic liners : an example of tailored multifunctional materials", *Adv. Eng. Mat.* **6**, 97(2004).