

Les matériaux de structure (ou à fonction structurale)

Yves Bréchet et Andréas Mortensen

Les matériaux à fonction structurale sont principalement destinés à résister, sans subir de déformation excessive et sans rompre, à des sollicitations mécaniques. Leur intégration dans des structures d'une grande diversité conduit toutefois à des exigences très diverses et souvent contradictoires : ces matériaux sont par conséquent très variés.

Ils font à ce point et depuis si longtemps part de notre existence quotidienne, dans le bâtiment, dans l'ameublement et l'électroménager, dans l'automobile et dans l'aéronautique par exemple, qu'il est facile de les oublier et de considérer de façon grossièrement fautive que leur évolution est achevée. Ces matériaux sont en développement continu et en constante amélioration. La recherche de compromis de plus en plus exigeants entre leurs différentes propriétés pour remplir un cahier des charges de plus en plus exigeant, pose à la science des matériaux de nombreux problèmes, fondamentaux aussi bien que technologiques. Les exigences accrues des cahiers des charges conduisent par exemple à développer des matériaux plus légers ou tenant mieux en température pour des propriétés mécaniques similaires, plus résistants aux agressions de l'environnement (chimiques ou mécaniques) ou mieux adaptés aux différentes opérations d'assemblage. Le tout devant, bien entendu, être réalisé à surcoût minimal, voire à coût décroissant.

Les matériaux à fonction structurale émergent aux quatre grandes classes de matériaux : les métaux, les polymères, les céramiques et les composites. Les développements de ces dernières années, et probablement la tendance à venir, consistent certes à faire émerger des espèces nouvelles de matériaux (nanomatériaux, matériaux cellulaires, composites nouveaux, métaux amorphes...). Cependant, il reste beaucoup de progrès et de découvertes scientifiques à faire dans l'amélioration des matériaux déjà présents dans ces quatre classes. Le compromis de propriétés atteignables est en constante amélioration, grâce notamment à la liaison plus forte qui est maintenant faite entre la compréhension du matériau et de ses propriétés d'une part, et celle des procédés d'élaboration et de mise en œuvre (mise en forme, traitements de surfaces, assemblage) d'autre part.

La démarche de la science des matériaux passe par une compréhension de la genèse des microstructures et de leur incidence sur les propriétés, afin d'augmenter dans toute la mesure du possible leur performance. C'est ainsi que la science et le génie des matériaux a trouvé sa définition il y a environ dix ans comme étant le domaine compris « entre » ces quatre pôles : structure, élaboration, propriétés, performance (*Materials Science and Engineering for the 1990s*, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., États-Unis, 1989).

Un nouveau défi est aujourd'hui de développer un couplage fort liant toutes les étapes allant de l'élaboration à la fonction.

C'est dans ce triple mouvement, optimisation des microstructures, intégration dans des structures convenablement dimensionnées, et choix optimal des matériaux et des procédés, que se positionne la dynamique de l'évolution actuelle des matériaux de structure. Les problèmes scientifiques qui émergent de ces nouvelles exigences sont parfois communs aux différentes classes de matériaux, et parfois spécifiques à une classe. Ces défis sont nombreux et variés, et il ne saurait être question d'exhaustivité. On peut toutefois dégager quelques grandes tendances et citer quelques exemples.

- Les métaux et alliages tirent leurs propriétés de la liaison métallique, qui permet la formation et la propagation de dislocations rendant ces matériaux ductiles et tenaces. L'optimisation de ces matériaux passe souvent par un raffinement contrôlé de la microstructure et une compréhension de sa stabilité à différentes températures. Les phases en présence dépendant fortement de la composition chimique, la première condition d'optimisation des métaux et alliages est un contrôle des hétérogénéités chimiques et structurales issues de leur solidification. La deuxième condition est une compréhension quantitative de la subtile combinaison de facteurs thermodynamiques et cinétiques qui gouverne les transformations de phase à l'état solide, ainsi que l'échelle des microstructures résultantes. Finalement, leur aptitude à la déformation fait de celle-ci un troisième moyen d'optimiser leur microstructure tout en les mettant en forme. Ces différents volets d'optimisation sont aussi reliés entre eux : la synergie entre déformation plastique et transformations de phases fournit ainsi un moyen puissant d'améliorer les propriétés de cette classe de matériaux. Il convient aussi de comprendre la relation entre ces microstructures et le comportement mécanique du matériau : si l'entrée dans le domaine plastique est relativement bien comprise, de nombreux efforts de recherche sont encore nécessaires pour comprendre l'endommagement mécanique et la ruine finale du matériau, en sollicitation monotone comme en fatigue. Enfin, deux domaines très prometteurs demandent à être développés : la compréhension des interactions avec l'environnement (corrosion, usure...) en liaison avec la microstructure, particulièrement à la surface du matériau, et la métallurgie des méthodes d'assemblage (soudage, soudage par friction-mélange...).

- Les céramiques sont caractérisées par des liaisons fortes (covalentes, ioniques). Celles-ci rendent leurs modules d'élasticité et leurs limites d'élasticité élevées, et leur confèrent leur caractère réfractaire et leur relative inertie chimique. Par contre, les dislocations y sont peu mobiles : la plasticité y est donc limitée, entraînant pour ces matériaux une grande fragilité et une grande sensibilité aux défauts. Cette situation oriente largement les recherches sur les céramiques structurales : il faut d'une part améliorer leur

ténacité, d'autre part éliminer au mieux les défauts d'élaboration qui sont critiques, compte tenu de la faible ténacité. De plus, ces matériaux étant peu aptes à la mise en forme, une préoccupation majeure est de trouver des méthodes d'élaboration leur donnant leur forme finale sans déformation ou usinage : méthodes classiques à chaud, mais aussi méthodes de chimie douce. Malgré leur bonne résistance aux agressions chimiques de l'environnement, les phénomènes complexes de rupture différée demandent aussi une attention spécifique pour ces matériaux.

- Les polymères sont caractérisés par la coexistence de deux types de liaisons (liaisons covalentes fortes et liaisons physiques faibles de type hydrogène ou Van der Waals) et d'un degré de liberté supplémentaire : la complexité des chaînes moléculaires qui les constituent. De ces degrés de liberté supplémentaire résultent des matériaux très versatiles, légers et faciles à mettre en forme, ductiles mais peu tenaces, et dont les propriétés élastiques et plastiques dépendent de façon cruciale de la température au voisinage de l'ambiante, de la chimie du polymère et de ses adjuvants éventuels, et des traitements thermomécaniques subis au cours de sa transformation. Ces remarques permettent de comprendre les directions de recherche dans le domaine des polymères à applications structurales, et pour les polymères amorphes, la validation de lois de comportement existantes qui ont le mérite d'être prédictives, et surtout leur passage en écriture tensorielle pour les rendre compatibles avec l'utilisation de codes de calcul. Pour les polymères semi-cristallins, comparables aux composites particuliers (à renforts nanométriques) mais avec des propriétés interfaciales très spécifiques, les relations entre structure chimique fine et tenue au fluage et propagation de fissure commencent à être étudiées. On sait que certains paramètres de cette architecture (distributions des longueurs de chaînes, localisation des branchements) modifient beaucoup la durabilité. Le nombre de molécules qui lient les parties cristallines et les parties amorphes joue en particulier un rôle déterminant.

- Les composites sont formés par combinaison, « forcée » dans la mesure où celle-ci n'est pas obtenue par des méthodes d'alliage ou de chimie classiques, de matériaux aussi divers que des métaux, des céramiques et des polymères. Cette combinaison peut être obtenue à des échelles allant du nanomètre au millimètre, et permet d'avoir des propriétés uniques, ajustables et dépassant la somme de leurs ingrédients. De par la complexité accrue de leurs procédés d'élaboration, l'élimination des défauts, aussi bien que la maîtrise des coûts d'élaboration et de mise en œuvre, sont des problèmes cruciaux dans le développement des composites. Liées de la même manière à leur nature de combinaison artificielle de matériaux divers, les questions associées aux interfaces (tenue mécanique, transport, compatibilité chimique) sont tout particulièrement importantes. Enfin, ces matériaux présentent des difficultés spécifiques d'assemblage et de recyclage qui demandent des efforts particuliers de recherche. La force des composites étant leur possibilité d'adaptation pour obtenir des matériaux « sur mesure », ils sont aussi un terrain de choix pour la réalisation de composants à hétérogénéité contrôlée et à fonction de contrôle intégrée (matériaux dits « intelligents »). Les composites structuraux les plus utilisés sont à matrice polymère, mais les composites céramique/céramique sont une réponse possible au problème de la ténacité médiocre des céramiques monolithiques, et les composites à matrice métallique (métal/céramique ou métal/

vide) ont aussi des niches d'application correspondant à des combinaisons de propriétés uniques. Pour les composites particuliers à matrice polymère, il reste à comprendre pourquoi et comment les propriétés mécaniques sont souvent meilleures dans les systèmes élastomériques ou semi-cristallins pour des particules nanométriques que pour des particules micrométriques. La difficulté vient du fait que pour modifier la dispersion et même pour préparer des particules très petites, le procédé lui-même modifie souvent la physico-chimie de leur surface... Dans ce domaine, les couplages particules-matrice et particule-particule (effet de percolation, formation de réseaux plus ou moins rigides) restent mal connus et peu modélisés.

Pour l'ensemble de ces matériaux à fonction structurale, des questions centrales sont communes à leurs stratégies de développement :

- identification et contrôle des causes de dispersion dans la structure et les propriétés,
- maîtrise des procédés d'élaboration et de mise en forme,
- optimisation des procédés de mise en œuvre (traitements de surface et assemblages),
- analyse du comportement en service au cours de la vie du composant et dans son recyclage programmé,
- méthodes de contrôle non destructif et analyse de la durée de vie résiduelle.

Le développement de matériaux nouveaux (au sens le plus large du terme !) est une activité ancienne (on peut penser aux différents « âges » de l'humanité) ; par contre, la transformation de ce développement en science est plus nouvelle, remontant *grosso modo* à la seconde moitié du XX^e siècle. Il a résulté de cette naissance relativement récente d'une science presque nouvelle, et de la réalisation de tout ce qu'elle peut offrir, une faute de jeunesse (dans les années 80), consistant à se laisser hypnotiser par une propriété particulièrement attrayante pour espérer que le matériau la possédant serait *de facto* intéressant pour un grand nombre d'applications industrielles. L'expérience a prouvé que l'optimisation des matériaux ne peut être menée efficacement qu'associée à une analyse fonctionnelle soignée des cahiers des charges d'applications spécifiques visées, permettant de les produire et de les utiliser au mieux dans une optique de choix multicritères impliquant à un niveau d'importance équivalent la recherche des compromis de propriétés, les procédés de mise en forme et de mise en œuvre les mieux adaptés, et les analyses de viabilité économique afférentes. C'est dans cette approche combinant la science des matériaux, le génie des procédés et le dialogue avec les ingénieurs de conception que se situe aujourd'hui la démarche de produits nouveaux qui ne soient pas condamnés à demeurer pour toujours des matériaux d'avenir.

Les secteurs industriels des matériaux de structure sont très divers. Ils comprennent des producteurs et des transformateurs de tailles aussi variables que le spectre allant d'une aciérie intégrée à un petit fondeur ou un atelier de prothèses dentaires. Ils englobent aussi des domaines d'utilisations variés correspondant à des exigences très différentes dans les cahiers des charges. La recherche de l'allègement des structures est une constante dans le domaine des industries du transport, mais les surcoûts acceptables pour une performance accrue diffèrent fortement entre l'industrie automobile et, par exemple, les aviateurs ou l'industrie biomédicale. La recherche de la fiabilité est une constante de toutes les industries, mais elle

apparaîtra avec un poids différent suivant que l'on a affaire à l'industrie électronique ou à l'industrie électronucléaire.

Les exemples choisis dans ce chapitre illustrent cette diversité. Certains articles concernent des domaines d'application des matériaux de structure, d'autres des producteurs de matériaux des quatre classes citées ci-dessus. Il sera question de matériaux de structure de petite série à performances exceptionnelles aussi bien que de matériaux de grande diffusion. Il n'y a pas lieu de rechercher dans ce domaine la singularité exotique : un matériau adapté au mieux à sa fonction est un matériau de haute technicité, quel que soit le domaine de son application. Il suffit d'un peu d'attention et de curiosité intellectuelle pour se convaincre de ce que notre environnement quotidien, les objets les plus familiers, ne remplissent aussi efficacement leur fonction que parce que la science des matériaux de structure a permis une amélioration constante de leurs performances (pensez par exemple à l'aluminium formant une canette de boisson dont la forme est obtenue par emboutissage profond d'une feuille auparavant rigoureusement plane, ou à ces composites rigides et tenaces résultant du mariage de deux matériaux fragiles, le verre et l'époxy, auxquels nous confions souvent nos vies dans le sport).

Les matériaux à fonction structurale tenant la clé du progrès pour tout ce qui porte, tout ce qui bouge, tout ce qui protège

et tout ce qui déplace, il est certain que le vaste champ d'opportunités qui reste encore à défricher demandera toute l'énergie d'une nouvelle génération de scientifiques et d'ingénieurs.



Y. Bréchet

Yves Bréchet

est professeur à l'INPG-ENSEEG*.

Andréas Mortensen

est professeur à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne**.



A. Mortensen

* LTPCM, BP 75, Domaine universitaire de Grenoble, 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex.
Tél. : 04 76 82 66 10. Fax : 04 76 82 66 44.
E-mail : ybrechet@ltpcm.inpg.fr

** MXD121, Laboratory of Mechanical Metallurgy, Institut of Materials, Swiss Federal Institut of Technology in Lausanne, EPFL, CH-1015, Lausanne, Suisse.
Tél. : +41 (21) 693 2912. Fax : +41 (21) 693 4664.
E-mail : andreas.mortensen@epfl.ch

