

Méthodologie de choix

La sélection des matériaux et des procédés

Méthodes rationnelles d'aide au choix

Yves Bréchet* professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG)

Summary : *Materials and process selection : rational methods*

Recent developments in materials and process selection for structural applications, using the performance index methods are reviewed. Their current implementation in softwares is presented. Possible developments in the field of materials design is outlined.

Mots clés : *Matériaux, procédés, sélection et optimisation.*

Key-words : *Materials, processes, optimisation and selection.*

Dans toute conception de produit industriel, il est indispensable de **choisir le matériau** dans lequel l'objet sera réalisé, et le **procédé** utilisé pour sa réalisation. Idéalement, ces deux choix doivent être faits simultanément. Mais il faut effectuer ce choix de façon itérative. En fait, il est plus réaliste de parler des **étapes du choix** des matériaux et des procédés. Pour effectuer le choix le plus performant, il est nécessaire de se poser la question à chaque étape de la conception : se poser la question du choix des matériaux uniquement à l'étape ultime biaise les possibilités. On ne conçoit pas une pièce en composites comme on la concevrait en aluminium. On ne dessine pas une structure en aluminium comme on la dessinerait en acier : les procédés de mise en œuvre, d'assemblage, de protection vis-à-vis des agressions extérieures étant différentes, la conception optimale se doit d'en rendre compte.

La complexité du choix des matériaux et des procédés : nécessité d'une approche rationnelle

Ce choix est à la fois crucial et difficile. Crucial car de lui dépend la performance de la conception et sa viabilité économique. Difficile en raison à la fois de la diversité des matériaux et des procédés possibles, et de la variété des requêtes exigées par la conception. On estime à 60 000 le nombre de matériaux disponibles et à environ 6 000 le nombre de procédés possibles. Il est impensable que le concepteur soit familier avec plus qu'une petite fraction de cette immense diver-

sité, et la difficulté du choix des matériaux tient, en partie, à cet « **hyperchoix des matériaux** ». Mais d'autre part, la variété des requêtes et leurs caractères souvent contradictoires viennent ajouter à la complexité liée à la multitude des possibilités, celle liée à la difficulté d'énoncer de façon objective les **performances recherchées**, c'est-à-dire le cahier des charges, et plus encore, peut-être, celle liée à la difficulté de gérer un choix multicritère.

Il est donc clairement utile, pour pouvoir se guider efficacement dans la variété des choix possibles, de disposer d'une **procédure systématique** pour sélectionner le procédé et le matériau le mieux adapté à une fonction ou à une pièce donnée. Cette procédure systématique doit être **suffisamment générale** pour pouvoir être appliquée à des conceptions très variées, et **suffisamment transparente** pour que l'utilisateur en garde la maîtrise et puisse intervenir au cours de la procédure de sélection, et laisser agir sa créativité et son imagination, sa propre expérience. Il est clair que la complexité de la démarche exclut la possibilité de sélectionner selon un schéma linéaire : une méthode de sélection des matériaux et des procédés est, avant tout, un **guide de réflexion**, une démarche rationnelle permettant d'envisager les solutions, innovantes ou classiques, qui peuvent être prometteuses. Imaginer qu'on peut disposer d'un logiciel qui « avalerait » un cahier des charges plus ou moins bien défini et en déduirait infailliblement la meilleure solution relève à ce jour de l'utopie. Penser qu'on peut structurer une démarche de sélection, utiliser à plein les possibilités de l'informatique et des banques de données pour orienter les choix possibles, devient aujourd'hui réaliste.

Aux différentes étapes de la conception [1], la sélection des matériaux et des procédés se pose en des termes différents, mais il est impératif de se poser cette question tout au long de la procédure de conception, faute de quoi l'on risque

* Laboratoire de thermodynamique et de physico-chimie métallurgiques (LTPCM), BP 75, Domaine universitaire de Grenoble, 38402 Saint Martin-d'Hères Cedex. Tél. : 04.76.82.65.00. Fax : 04.76.82.66.63. E-mail : ybrechet@ltpcm.inpg.fr

de se voir imposer une solution à moindre performance, faute d'avoir envisagé les différentes conceptions qu'un autre choix de matériau eût rendu possible. Le choix des matériaux et des procédés et la conception de la pièce se doivent idéalement d'être interactifs. A l'étape de conception préliminaire, on se doit de considérer l'ensemble des matériaux possibles, ce qui suggère l'utilisation de données sur de vastes familles, mais à relativement faible précision. Quand on parcourt les étapes successives de la sélection, les choix possibles deviennent de plus en plus précis dans des classes de matériaux de plus en plus définies : la conception détaillée impose le choix d'une nuance précise de matériau pour laquelle la conception est finalisée.

Un outil d'évaluation des matériaux de structure : la méthode des indices de performance

La rationalisation des méthodes de sélection a été entreprise voici moins de dix ans par M. Ashby, Cambridge, spécialiste bien connu des matériaux, et ce pour le cas des applications structurales [2] (industries mécaniques, génie civil, aéronautique...). L'exemple le plus simple qui vienne à l'esprit est la conception d'un tirant de longueur fixée, devant travailler en traction, sous une charge donnée sans s'allonger plus d'une grandeur prescrite, et que l'on doit réaliser à masse minimale [3]. En terme de propriétés, il est clair que la rigidité sera d'autant plus grande que le module d'élasticité E est plus élevé, et que la masse sera d'autant plus faible que la densité ρ du matériau choisi sera plus petite. Pour ce cas de figure, simple jusqu'à la caricature, comment peut-on comparer les matériaux ? Comment peut-on comparer un acier à fort module, mais dont la densité est élevée, à un alliage d'aluminium dont la densité est plus faible, mais le module aussi plus réduit ? Quel peut être pour cette situation l'avantage des alliages de titane ou des composites à matrice polymères ? Est-ce que les composites à matrice métalliques peuvent trouver un domaine potentiel d'application dans ce type de cahier des charges ? Il est clair que cette comparaison n'aura de sens que dans la mesure de la fiabilité des propriétés annoncées pour chaque matériau, mais il n'en demeure pas moins que cette comparaison objective, autant que faire se peut entre les différents matériaux, suppose une procédure systématique de dérivation de combinaisons de propriétés qui traduisent la « performance » d'un matériau à remplir ce cahier des charges. Dans le cas d'école énoncé ci-dessus, on voit clairement qu'il faut rechercher des matériaux qui ont le plus grand E possible et le plus petit ρ possible. Une façon de traduire cette recherche est de considérer les « propriétés spécifiques », en l'occurrence le « module spécifique » E/ρ . Mais on sent tout de suite ce que ce choix a d'arbitraire et d'imprécis : pourquoi E/ρ plutôt que E^2/ρ ou $E^{1/2}/\rho$? On sent bien que E^2/ρ favoriserait les matériaux à fort module (les aciers), alors que $E^{1/2}/\rho$ favoriserait les matériaux à faible densité (les alliages d'aluminium). En recherche d'une méthode objective de comparaison, il importe de pouvoir trancher entre les différentes options, et de pouvoir assurer que, pour la performance recherchée, le module spécifique est effectivement la mesure de l'adéquation

du matériau. Revenons donc à notre problème : on considère un tirant de longueur L dont la section S est libre : suivant le choix du matériau, on pourra avoir une section plus ou moins grande. Le tirant doit transmettre une force F sans se déformer élastiquement de plus de ΔL . Et on veut faire ce choix de telle façon que la masse M de l'ensemble soit minimale.

Traduisons ce cahier des charges en termes de propriétés : l'exigence de rigidité impose :

$$\frac{1}{E} \left(\frac{F}{S} \right) < \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

La masse de la pièce est donnée par :

$$M = \rho LS \quad (2)$$

En éliminant la variable libre S entre les équations (1) et (2), il devient clair que pour réaliser le cahier des charges, la pièce doit avoir une masse au moins égale à :

$$M > \left(\frac{\rho}{E} \right) \left(\frac{FL^2}{\Delta L} \right) \quad (3)$$

Cette expression comprend deux groupes de termes : le second groupe est formé de conditions imposées par la conception : quel que soit le matériau sélectionné, ce groupe de termes demeure le même car il traduit ce que le concepteur exige de la pièce. Le premier groupe de terme comprend

Tableau I - Quelques indices de performance classiques [2, 3].

Indices de performance en rigidité à masse minimale	
Forme Fonction et contrainte	Indice de performance ^{1,2}
<i>Barre de traction</i> Rigidité et longueur spécifiées, section libre	E/ρ
<i>Arbre de torsion</i> Rigidité, longueur et forme spécifiées, section libre	$G^{1/2}/\rho$
Rigidité, longueur, rayon externe spécifiés, épaisseur libre	G/ρ
Rigidité, longueur, épaisseur spécifiées, rayon externe libre	$G^{1/3}/\rho$
<i>Poutre en flexion</i> Rigidité, longueur, forme spécifiées, section libre	$E^{1/2}/\rho$
Rigidité, longueur, hauteur spécifiées, largeur libre	E/ρ
Rigidité, longueur, largeur spécifiées, hauteur libre	$E^{1/3}/\rho$
<i>Colonne soumise au flambement</i> Longueur, charge, forme spécifiées, section libre	$E^{1/2}/\rho$
<i>Plaque en flexion</i> Rigidité, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$E^{1/3}/\rho$
<i>Plaque en compression</i> Charge, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$E^{1/3}/\rho$
<i>Cylindre sous pression interne</i> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	E/ρ
<i>Coquille sphérique sous pression</i> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	$E/(1 - \nu)\rho$

1) Pour avoir les indices de coût minimal ou à volume minimal, il suffit de remplacer ρ masse volumique par ρC ou par l respectivement.

2) G = module de cisaillement ; C = coût au kg ; E = module d'élasticité.

NB : lorsque la variable libre est la section, c'est à l'aire de la section que l'on se réfère.

Indices de performance en solidité à masse minimale	
Forme Fonction et contrainte	Indice de performance ^{1,2}
<i>Barre de traction</i> Solidité et longueur spécifiées, section libre	R_c/ρ
<i>Arbre de torsion</i> Solidité, longueur et forme spécifiées, section libre Solidité, longueur, rayon externe spécifiés, épaisseur libre Solidité, longueur, épaisseur spécifiées, rayon externe libre	$R_c^{2/3}/\rho$ R_c/ρ $R_c^{1/2}/\rho$
<i>Poutre en flexion</i> Solidité, longueur, forme spécifiées, section libre Solidité, longueur, hauteur spécifiées, largeur libre Solidité, longueur, largeur spécifiées, hauteur libre	$R_c^{2/3}/\rho$ R_c/ρ $R_c^{1/2}/\rho$
<i>Colonne soumise au flambement</i> Longueur, charge, forme spécifiées, section libre	R_c/ρ
<i>Plaque en flexion</i> Solidité, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$R_c^{1/2}/\rho$
<i>Plaque en compression</i> Charge, longueur, largeur spécifiées, épaisseur libre	$R_c^{1/2}/\rho$
<i>Cylindre sous pression interne</i> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	R_c/ρ
<i>Coquille sphérique sous pression</i> Pression, rayon, distorsion élastique spécifiés, épaisseur libre	R_c/ρ

1) Pour avoir les indices à coût minimal ou à volume minimal, il suffit de remplacer ρ , masse volumique par ρC ou par l respectivement.

2) C = coût au kg ; R = limite d'élasticité.

NB : lorsque la variable libre est la section, c'est à l'aire de la section que l'on se réfère.

une combinaison de propriétés du matériau : le matériau qui permettra la conception à masse minimale est effectivement celui qui rendra maximale la grandeur E/ρ : le module spécifique traduit objectivement la **performance pour un matériau à réaliser un tirant rigide à masse minimale**. Revenons à la dérivation de l'indice de performance : nous avons spécifié la forme (un tirant), les variables géométriques libres (la section) et celles qui sont imposées (la longueur), la contrainte à réaliser (ne pas subir de déflexion élastique supérieure à $\Delta L/L$) et l'optimum à recherche (minimiser la masse) : cette ensemble d'information nous a permis de définir un **indice de performance**. Supposons que la contrainte à remplir soit une exigence de non-plastification, toutes les autres requêtes du cahier des charges demeurant les mêmes : dans ce cas, l'équation d'indice de performance approprié est donné par : R_c/ρ , ou R_c est la limite d'élasticité du matériau. Si la sollicitation avait été en flexion, à rigidité imposée, c'est $E^{1/2}/\rho$ qu'il aurait fallu optimiser.

Actuellement, les indices de performances pour les grandes classes de sollicitations mécaniques ou thermiques sont disponibles (tableau I). La méthode de dérivation est d'une simplicité enfantine et ne dépasse pas la résistance des matériaux élémentaires : on peut donc, sans peine, les adapter à de très nombreux problèmes.

Les banques de données pour le choix des matériaux

Pour que cette méthode puisse être applicable à des cas concrets, il a fallu développer des **banques de données** sur les matériaux, qui soient **homogènes** quelle que soit la classe d'appartenance (métaux, polymères, céramiques, composites...). Ces banques de données, sous un format identique, ont des contenus plus ou moins spécialisés (banque générale, banque alliages ferreux, alliages légers, banque polymères, banque bois...). Les informations répertoriées pour chaque matériau sont soit quantitatives (comme les propriétés mécaniques et thermiques, le prix...), soit qualitatives (comme la tenue dans un environnement donné), soit booléennes (comme l'aptitude aux revêtements de surface ou la disponibilité sous une forme donnée. Leur réalisation a nécessité un travail énorme de collecte et de vérification de données, et la mise au point de méthodes d'estimation pour compléter les informations manquantes [4]. Ces banques de données permettent de comparer les matériaux pour une performance donnée (tableau II).

Tableau II - Comparaison de quelques matériaux pour des indices classiques.

Matériaux	Rigidité en traction E/ρ	Rigidité en flexion $E^{1/2}/\rho$	Solidité en traction σ_c/ρ
Aluminium de corroyage	27 - 31	3,3 - 3,8	16 - 182
Aciers à haut carbone	25 - 27	1,8 - 1,9	51 - 166
Alliages de titane	21,7 - 28,5	2,2 - 2,5	47 - 233
Magnésium de corroyage	25	3,7 - 3,8	67 - 241
Composites UD fibre carbone	133 - 160	9,4 - 10,3	333 - 1050
Sapin	16 - 32	5,6 - 8	106 - 370

Les logiciels d'aide à la sélection

Il est extrêmement rare, toutefois, qu'un cahier des charges se réduise à une seule performance. En général, la sélection des matériaux répond à une **requête multicritère**. Il a donc été nécessaire de développer des **logiciels conviviaux** d'aide à la sélection des matériaux qui puissent guider le concepteur dans la procédure de choix. Le logiciel CMS de Cambridge [5] et le logiciel Fuzzymat de Grenoble [6] répondent à cette fonction : gérer un cahier des charges multicritères, avec des requêtes d'importance relative variable, et des possibilités de compromis. Le logiciel Fuzzymat, faisant usage de la « logique floue », permet de prendre en compte le caractère intrinsèquement complexe de la procédure de sélection (figure 1).

Au-delà de ces logiciels « génériques », la recherche des toutes dernières années a permis de développer des méthodes d'intégration du choix des procédés et des matériaux (logiciel de sélection des alliages de moulage [7]), des méthodes de sélection de matériaux à propriétés continuellement variables (logiciels de sélection des composites à

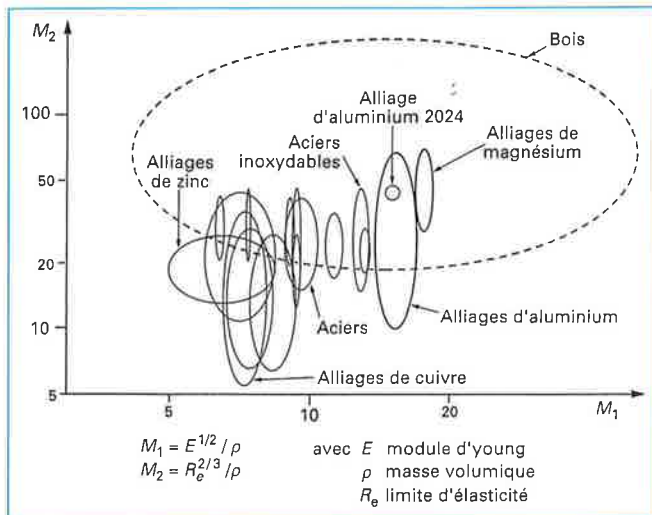


Figure 1 - Carte de sélection pour optimiser la masse à rigidité et à solidité fixées d'une pièce sollicitée en flexion.

matrice polymère [8]), des systèmes d'aide à la sélection des méthodes d'assemblage [9], des méthodes d'optimisation de structure (logiciel de conception des structures sandwich utilisant des algorithmes génétiques) [10], des logiciels de formulation (pour les verres). Chacune de ces applications correspond, à la fois, à un problème scientifique et à une application.

Une discipline en plein développement

La branche de la science des matériaux, que nous avons brièvement présentée dans cet article, est très récente même si elle répond à un besoin très ancien. Son développement a été rendu nécessaire par l'hyperchoix des matériaux résultant de l'activité des chimistes, des physiciens et des métallurgistes dans les dernières décennies. Il a été rendu possible par le développement d'outils informatiques permettant de stocker et de gérer de nombreuses données, et par le développement d'outils d'intelligence artificielle tels que la logique floue, les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques. Dans ces différentes directions, le travail de recherche se poursuit, avec une activité importante dans le domaine de la sélection des procédés et des méthodes de mise en œuvre.

Mais il est tentant de « retourner le gant » : on peut utiliser ces méthodes comme guides de développement et de formulation de nouveaux matériaux, comme outils d'identification d'un débouché possible pour un matériau donné. Il faut, pour cela, développer des méthodes systématiques d'exploration de banques de données de cahiers des

charges. Un exemple de cette démarche a récemment été proposé pour identifier des applications possibles aux amorphes métalliques massifs ou aux mousses métalliques [11]. L'objectif ultime est donc de faire, de ces outils de sélection des matériaux, des guides de conception de matériaux.

Conclusions

Nous avons brièvement envisagé les développements récents d'une nouvelle discipline : la sélection des matériaux et des procédés. Les méthodes de sélection permettent, dès aujourd'hui, de traiter des problèmes de sélection multicritère dans le domaine des applications structurales. Une démarche parallèle est envisageable pour les applications fonctionnelles. Enfin, ces méthodes peuvent fournir des guides de développement de matériaux, en vue d'un cahier des charges précis, qui permettent d'espérer que la déconvenue classique « des matériaux d'avenir qui le restent longtemps » soit moins fréquente. C'est donc à la fois au bureau d'étude et au laboratoire que s'adressent ces outils, à la fois au formateur d'ingénieur [12] et à l'industriel producteur ou utilisateur de matériaux. ■

Références

- [1] Pahl G., Beitz W., *Engineering Design*, Springer, 1980.
- [2] Ashby M., *Materials selection in mechanical design*, Pergamon Press, 1994.
- [3] Bréchet Y., Ashby M., Dupeux M., Louchet F., *Traité de conception des produits industriels, Choix et usage des matériaux*, Techniques de l'Ingénieur, 1996.
- [4] Bassetti D., Bréchet Y., Ashby M., Proc. Roy.Soc., 1998 (sous presse).
- [5] Ashby M., Cebon D., CMS, Granta Design, 1994.
- [6] Bassetti D., *Fuzzymat*, B & I, 1996.
- [7] Bréchet Y., Bassetti D., Péchambert P., *Aerospace Materials Engineering*, Le Bourget, CEAS, 1997.
- [8] Péchambert P., Bassetti D., Bréchet Y., Salvo L., EECM7, 1996, vol 2, p. 383.
- [9] LeBacq C., Rapport de DEA, *Méthodes de sélection des assemblages métalliques*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1997.
- [10] Bréchet Y., Bassetti D., Heiberg G., Péchambert P., Salvo L., Int. Conference on composite materials, Lake Louise (1997), P. Nicholson Ed., sous presse.
- [11] Bréchet Y., Landru D., Colloque franco-espagnol sur les matériaux nouveaux (1997), sous presse.
- [12] Chaque année, dans le cadre d'une formation d'ingénieurs en sélection des matériaux et des procédés, à l'INPG, une vingtaine d'études de cas donnés par des industriels permettent à la fois de tester les méthodes développées en recherche, d'identifier les manques et les développements nécessaires, et de former des ingénieurs à la sélection des matériaux à partir de problèmes concrets de l'industrie. Les projets sont choisis par les élèves en octobre et le travail donne lieu à un rapport en février.