

Vers une **Connexion** des corps de métiers, pour des **microstructures** **améliorées** pour les **transports**

Titulaire d'un doctorat en acoustique et vibrations de l'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon, François-Xavier Bécot est associé-fondateur de la PME Matelys¹ créée en 2005. Il y exerce en tant que chercheur en acoustique et matériaux poro-élastiques.

La recherche de transports toujours plus efficaces et confortables (allègement et confort des véhicules, durabilité des routes et des véhicules) stimule l'utilisation de nouveaux matériaux. Parmi ceux-là, les matériaux poreux occupent une place privilégiée ; leur nature même est promesse de diversité. Les laboratoires de recherche progressent beaucoup dans les techniques de caractérisation de ces matériaux.

La conception, le développement et la fabrication de ces nouveaux matériaux, quelles que soient leurs applications,

font intervenir différents corps de métiers, dont celui de la chimie... Le constat est que ces différents corps ont leurs vocabulaires propres, leurs techniques propres, leurs procédés propres. La communication entre eux est difficile, ce qui peut porter préjudice au développement du matériau.

Ce chapitre s'intéresse aux matériaux poreux. L'étude de leur microstructure permet de créer des passerelles entre les différents corps de métiers qui les conçoivent, les mettent en œuvre et les utilisent.

D'après la conférence de François-Xavier Bécot
Avec les contributions de Fabien Chevillotte et Luc Jaouen

1. www.matelys.com

1 Qu'est-ce qu'un matériau poreux ?

Les matériaux poreux se rencontrent quotidiennement (**Figure 1**). Ainsi, la laine de verre est utilisée dans les bâtiments, dans l'électroménager, dans les surfaces extérieures et bien sûr dans l'automobile ; les mousses servent à emballer des objets précieux tels que les ordinateurs, mais aussi à fabriquer des sièges ou des matelas. On trouve également des matériaux poreux dans le domaine du nettoyage, comme toutes les variétés d'éponges. On développe par ailleurs des matériaux poreux pour des applications très spécifiques, électromagnétiques ou acoustiques, pour l'isolation phonique ou pour obtenir des salles anéchoïques (qui absorbent l'énergie reçue par les murs de façon à ce qu'un objet d'étude placé au milieu de la salle ne soit pas perturbé par les réflexions des parois). Enfin, nous mangeons des matériaux poreux à peu près tous les matins : céréales, cakes et autres pains sont en effet des matières poreuses.

2 Différents types de matériaux poreux

2.1. Les matériaux fibreux

Observée au microscope électronique à balayage (MEB) (**Figure 2B**), la laine de verre présente des fibres plus ou moins longues, de plus ou moins grands diamètres, arrangées de manière anarchique. À plus grande échelle, on obtient des matelas de fibres que l'on peut empiler les uns sur les autres pour former le matériau final (**Figure 2A**).

Chacun sait, pour avoir manipulé une laine de verre afin d'isoler par exemple un mur ou un bâtiment, combien cela est urticant. Il est donc préférable de rajouter des faces cartonnées afin de pouvoir la manipuler. Ce matériau est utilisé pour l'isolation thermique et phonique.

2.2. Les mousses

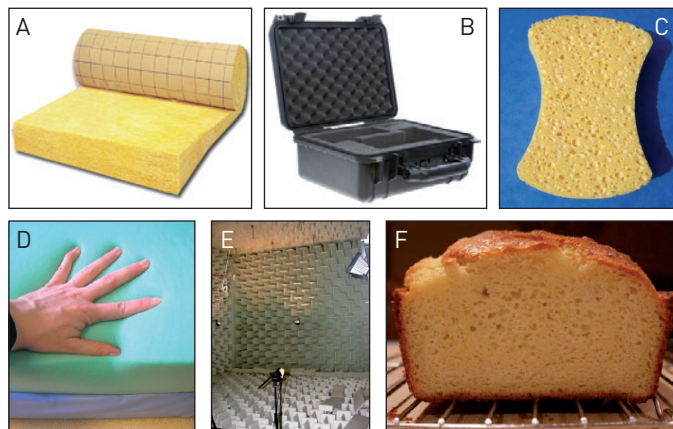
2.2.1. Les mousses polyuréthanes (**Figure 3**)

Les mousses, d'emballage ou de confort, sont en général à base de polyuréthane. Au MEB, on observe des structures qui rappellent celle des ballons de football et dont la particularité est d'être interconnectées. Des sortes de « fenêtres » entre ballons permettent de faire passer l'air. Cette circulation de l'air a une double fonction : elle peut être utilisée à des fins de filtration, pour améliorer l'acoustique des locaux, par exemple. Également, elles confèrent une certaine souplesse au matériau, aisément

Figure 1

Exemples d'utilisations de matériaux poreux : laine de verre (A), mousse d'emballage (B), éponge (C), matelas (D), salle anéchoïde (E) et pain (F).

Sources : (A) Acqualys, (B) Foamcraft, (C, E et F) Matelys, (D) Escarre



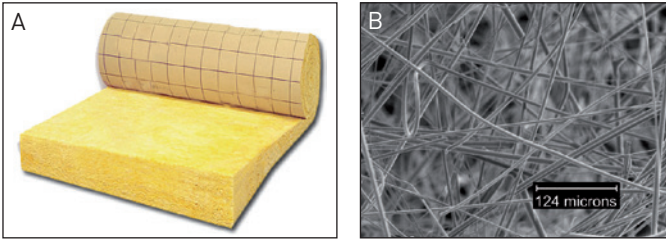


Figure 2

La laine de verre, un matériau fibreux.

Sources : (A) Acqualys, (B) Matelys

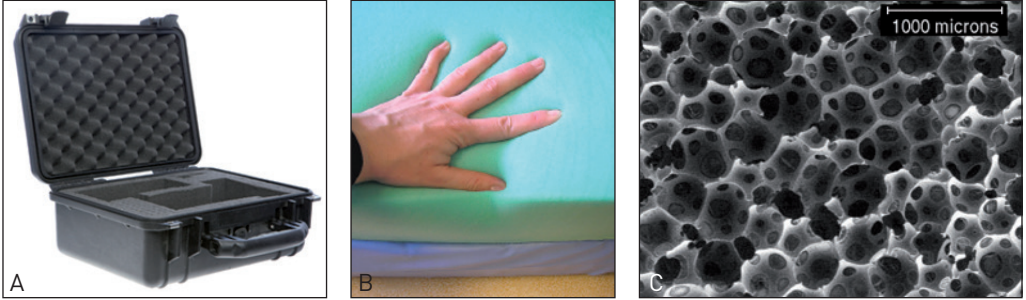


Figure 3

Mousses polyuréthane : mousse d'emballage (A), matelas (B), microstructure au MEB (C).

Sources : (A) Foamcraft, (B) Escarre, (C) Matelys

perçue par exemple dans l'utilisation d'un siège – elle provient de l'évacuation de l'air contenu dans la matière poreuse, vers les côtés.

2.2.2. Les mousses de mélamine

Les mousses de mélamine sont utilisées pour des applications très spécifiques, acoustiques ou électromagnétiques. Elles sont vendues dans le commerce en tant qu'éponges, blanches ou colorées, elles interviennent pour tout ce qui touche au nettoyage, car ce sont des produits très abrasifs (Figure 4A).

Observées au MEB, ces mousses apparaissent structurées (Figure 4C). On recon-

naît la structure en ballon de football, moins régulière mais plus interconnectée. Dans ces structures, l'air peut circuler plus librement.

La partie solide – la partie matière –, représentée en blanc sur la Figure 4A, est restreinte, de l'ordre de 2%. Dans les matériaux fibreux, ce pourcentage de matière est du même ordre de grandeur. On transporte 98 % d'air quand on déplace ces matières ! Acheminer les matériaux vers les utilisateurs finaux est donc un gros problème pour les fabricants.

2.2.3. Les mousses métalliques

Dernier exemple de mousse : les mousses métalliques qui

Figure 4

Mousses de mélamine : éponges (A), salle anéchoïque (B), microstructure au MEB (C).

Sources : (A) BASF, (B) Matelys, (C) Luc Jaouen

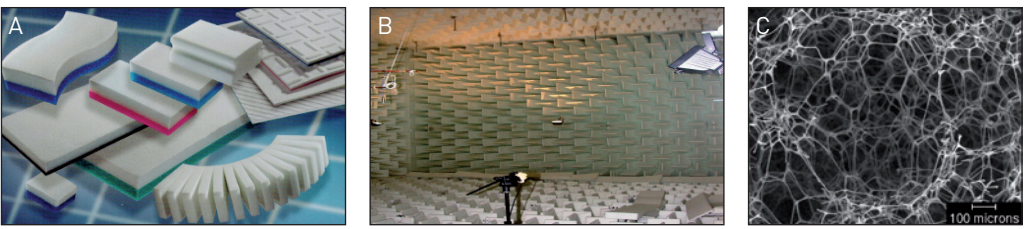
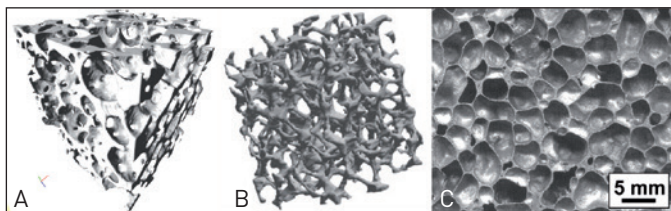


Figure 5

Mousses métalliques plus ou moins réticulées : aluminium (A) ; aluminium fritté (B) ; cuivre (C).
Sources : (A) Lafarge, (B) Camille Perrot, (C) Wikipedia (GNU free documentation license)



peuvent être plus ou moins réticulées. Dans la **Figure 5**, on va du plus ouvert au moins ouvert : une mousse d'aluminium (**Figure 5A**), une mousse d'aluminium produite par frittage (**Figure 5B**), une mousse de cuivre avec des pores très fermés (**Figure 5C**).

Ces mousses ont été développées à l'origine pour absorber les chocs (ballistique). Elles servent aussi comme diffuseurs thermiques ; elles peuvent remplacer les bruyants ventilateurs de nos PC en transportant la chaleur d'un endroit chaud du PC (ou de la solution qui chauffe) à un autre où la chaleur va pouvoir diffuser de façon beaucoup plus efficace.

2.3. Les matériaux granulaires

Les matériaux granulaires sont également des matériaux poreux. On peut en citer deux exemples très communs.

Le premier est celui des enrobés de chaussée (voir le **Chapitre d'H. Van Damme**) ; la **Figure 6A** représente un béton bitumineux dont on voit très bien la partie solide, les cailloux, la partie noire étant la partie bitume qui sert de liant tout en laissant un pourcentage très élevé de porosité. L'air doit pouvoir circuler, pour assurer un rôle acoustique

mais aussi pour des propriétés de drainage de l'eau. Ce béton a été réalisé dans le cadre d'une collaboration entre Eiffage² et Matelys ; il a obtenu un prix pour ses performances acoustiques.

Le deuxième exemple (**Figure 6B**) est un clin d'œil à un mélange de granules et de fibres, produit à partir de matière recyclée. Il est fabriqué par une société anglaise partenaire de Matelys. Les anglais, qui aiment le confort, apprécient les moquettes épaisses, les gros velours. Mais qu'en faire, après usage ? Le procédé consiste à raser les moquettes pour en extraire la partie fibre, puis pour la partie colle avec le liant, de tout concasser pour produire des granules et de remodeler le tout avec un procédé d'extrusion³ froide, à température ambiante. Ces matériaux présentent des bulles de petites et de plus grosses tailles. En dimensionnant bien la proportion de grosses bulles par rapport aux plus petites, on peut atteindre des performances acoustiques tout à fait intéressantes. Ces produits sont utilisés actuellement pour des

2. www.eiffage.com

3. L'extrusion est un procédé de mise en forme des matières plastiques qui consiste à pousser la matière à fluidifier à travers une filière.

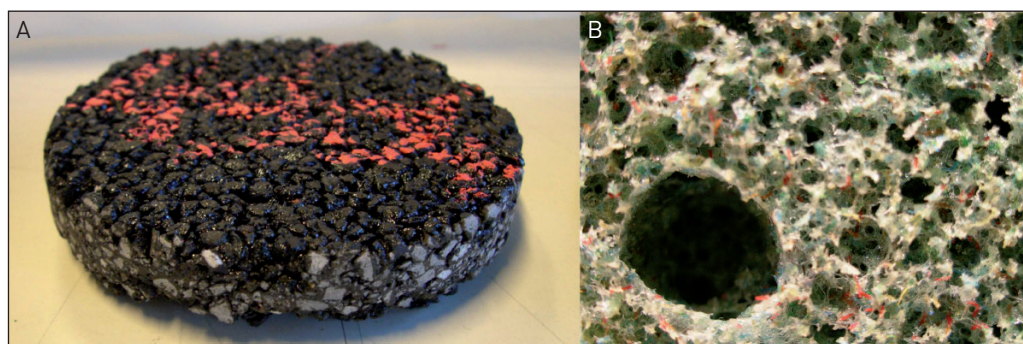


Figure 6

Exemple de matériaux granulaires : béton bitumineux (A), granulat issu de recyclage (B).

Source : Matelys

sous-couches, sous-parquets ou sous-carrelages dans les bâtiments.

2.4. Les textiles et les plaques perforées

Derniers exemples de matériaux poreux, les textiles et les plaques perforées (Figure 7). Une plaque perforée peut être regardée, quoiqu'à une autre échelle, comme un mélange de solide et d'air, l'air étant

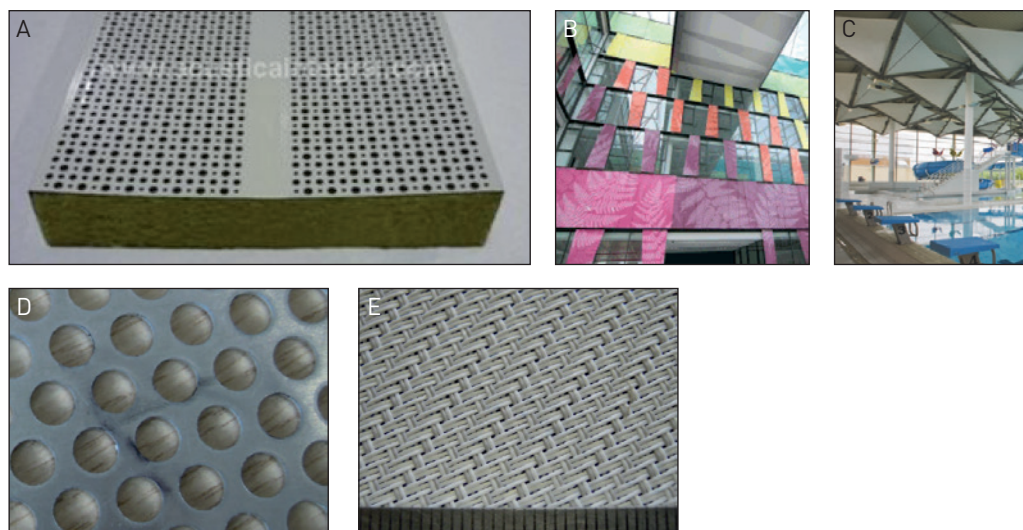
contenu dans les perforations. D'un point de vue de modélisation, on peut considérer qu'il s'agit d'un matériau poreux. Les textiles ou les plaques perforées peuvent être utilisés comme protections ou comme habillages de matériaux, ainsi que pour occulter la lumière (ce qui est d'ailleurs leur première utilisation). Par ailleurs, leurs tenues au feu et aux atmosphères humides permettent de les utiliser dans les piscines

Figure 7

Exemples de textiles et de plaques perforées.

Sources :

(A) www.directindustry.fr, (B et C) Mermet, (D et E) Matelys



ou dans les milieux extérieurs. Ce type de solutions est aussi utilisé de manière courante sur des écrans antibruit, en extérieur.

Après ces descriptions de différents matériaux poreux, rassemblons le vocabulaire de différents corps de métiers qui travaillent sur ces matériaux dans l'**Encart « Le vocabulaire des différents corps de métiers »**.

3 Procédés de fabrication et microstructures

La microstructure des corps poreux est très sensible aux procédés de fabrication : température, constituants des mélanges, vitesse de réaction, taille des réacteurs, etc., comme nous allons le voir dans les exemples qui suivent.

LE VOCABULAIRE DES DIFFÉRENTS CORPS DE MÉTIERS

Les matériaux poreux sont utilisés par différents corps de métier. Chacun a ses propres préoccupations et a développé son propre vocabulaire. Voici un échantillonnage qui en montre la richesse.

Le vocabulaire du chimiste

Commençons par lui. C'est lui qui met au point la formulation du procédé ; aussi parle-t-il en termes de **formulation des matériaux**, de **polymérisation**, de **réactions chimiques complexes**... Il parle en **dosage de composant**, en rôle des **adjuvants**, en **réticulation**, etc. C'est un premier type de vocabulaire.

Le vocabulaire de l'assembleur

C'est lui qui prend la matière première, la mousse, la laine de verre, etc., et la met en forme pour produire le traitement insonorisant, l'éponge, ou autre chose. Il parle en termes de **vitesse d'avancement**, de **calandrage**, de **taux de compression**, de **jauge** pour les métiers à tisser, de densité du matériau... Il utilise même des éléments de vocabulaire plus exotiques comme le **décitex**, grandeur qui est propre aux métiers du textile et qui combine la densité et la taille des fibres.

Vers l'utilisateur final : le mécanicien et l'acousticien

Si l'on s'approche un peu plus de l'utilisateur final, on trouve le mécanicien, qui a une palette de solutions ou de matériaux parmi lesquels il faut choisir. Lui, ne parle pas en termes de procédés de fabrication, il n'y connaît rien. Quel est son vocabulaire ? Il parle en termes de **raideur**, de **tenue mécanique**, en termes de **portance**, si l'on est sur des sièges auto, sur des sièges de confort, ou bien encore, s'il est plus perspicace, il parle de **masse volumique** ou de **densité**, de **module d'Young**, de **amortissement** ou de **coefficient de Poisson**.

L'acousticien est comme le mécanicien, il ne parle pas en termes de **réticulation**. Il souhaite connaître le fonctionnement en termes de **correction acoustique**, pour diminuer les échos à l'intérieur d'une salle, ou en termes de **isolation acoustique**, pour ne pas entendre le bruit de la circulation au dehors. Il utilise, principalement le **coefficient d'absorption sonore** et le **coefficient de transmission sonore**. Ces quantités peuvent être reliées à des paramètres plus phénoménologiques, à savoir la **résistivité statique** au passage à l'air, la **porosité**, déjà évoquée, ainsi que des **longueurs caractéristiques** associées aux **dimensions caractéristiques** du matériau, etc. La liste n'est pas exhaustive.

3.1. Les mousses de polyuréthane

Ces mousses sont essentiellement un mélange de polyols et d'isocyanate. Le principe est très simple, identique à celui d'une recette de « gâteau de mousse » (**Figure 8**) : le mélange est déposé sur un tapis où, comme un gâteau, il lève. Il existe deux types de procédés : batch ou continu. On obtient ainsi un gros pain, qu'il faut laisser refroidir, avec des temps de curage plus ou moins longs. C'est exactement la même chose que la cuisson d'un gâteau, que l'on sort du four une fois cuit, pour le laisser refroidir.

L'observation au MEB (**Figure 9**) montre les habituelles microstructures en ballons de football, obtenues avec deux jeux de paramètres différents ; le taux d'ouverture entre les bulles est différent.

Cela signifie que le taux d'ouverture diffère selon la fabrication. Ce taux détermine le comportement acoustique, mécanique, thermique, etc., de la mousse. L'air ne peut plus passer, ne peut plus circuler ou, du moins, il est freiné. Il est possible d'aller vers des situations extrêmes où quasiment toutes les ouvertures, toutes les fenêtres sont fermées. D'un point de

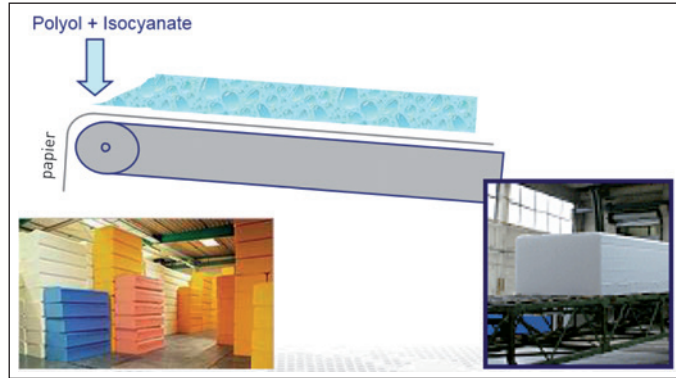


Figure 8

Mousses de polyuréthane refendues.
Source : Arnaud Duval-Faurecia

vue de l'acousticien ou du mécanicien, on parle par exemple en termes de portance ou de résistance au passage à l'air. Ce dernier paramètre, s'il est modifié, a un impact important sur les propriétés acoustiques résultantes du matériau.

3.2. Les systèmes fibreux

Pour les matériaux fibreux, ce qui est contrôlé lors de la fabrication, c'est essentiellement la taille des fibres à la sortie de l'assiette de fibrage et le taux de compression en sortie de four (**Figure 10**).

Remarquons que, pour le thermicien qui parle en termes de conductivité thermique ou l'acousticien qui parle essentiellement en termes de résistance au passage à l'air, le lien entre la microstructure et la propriété fonctionnelle n'est pas direct.

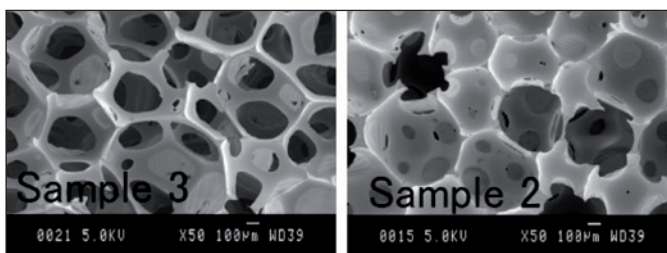
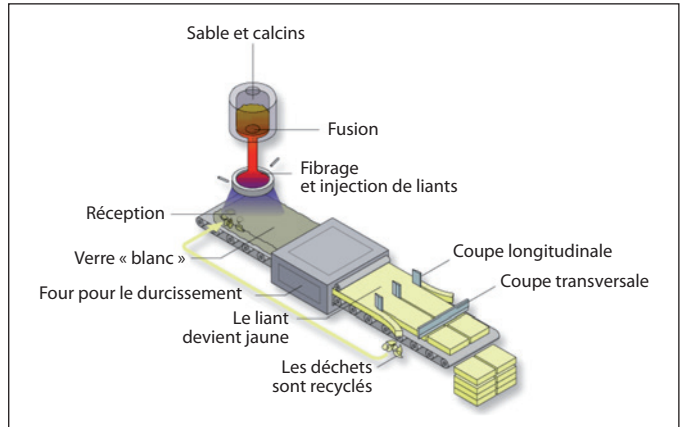


Figure 9

Mousses au MEB.
Source : Kino et coll., App. Acou.,
73 (2012)

Figure 10

Contrôle de la taille des fibres.



3.3. Exemple des métiers à tisser

Autre exemple, les métiers à tisser où l'on parle de taille de fils, de jauge, le lien avec l'occultation solaire, ou avec les propriétés acoustiques ou de filtration... ce n'est pas non plus évident.

4 Microstructures et fonctionnalités

Cette dernière partie présente des exemples de calculs (principalement illustrés par les études de mousses) qui font le lien entre microstructures et propriétés ou fonctionnalités finales (**Encart « L'indispensable recours à la modélisation »**).

4.1. Méthodes d'étude des mousses

La partie solide d'une mousse ressemble à un réseau cubique centré où les ballons de football (où la partie fluide) seraient situés aux sommets du cube et en son centre. La partie solide, le squelette, est schématiquement indiquée sur la **Figure 11**. Pour

déterminer les propriétés mécaniques, on peut effectuer un test en compression : la structure se déforme, et bombe un peu sur le côté. On peut aussi faire des tests en cisaillement, où l'on applique une déformation en direction opposée sur les deux côtés de la cellule. À partir de calculs réalisés à l'échelle microscopique, on peut calculer une « matrice de rigidité » et les paramètres élastiques qui en résultent : densité, module d'Young, coefficient de Poisson. Il est ainsi possible d'associer des performances aux termes de portance, de raideur.

4.2. Multicouches et propriétés acoustiques

Dans un système multicouches, par exemple formé d'une plaque de plâtre avec un enduit, avec de l'autre côté une laine de verre, puis une autre plaque de plâtre (**Figure 12**), on peut changer les propriétés de la couche intermédiaire en faisant varier les tailles de bulles, la proportion de grosses bulles par rapport aux petites, la

L'INDISPENSABLE RECOURS À LA MODÉLISATION

Les « fonctionnalités » du matériau sont ses réponses aux excitations extérieures (mécaniques, électriques, optiques, thermiques).

Si l'on connaît la nature et l'arrangement spatial des atomes et les potentiels qui décrivent les interactions entre eux, on peut calculer ces réponses... donc les propriétés du matériau. On peut aussi, dans une démarche plus constructive, définir l'arrangement atomique qui possède telle ou telle propriété que l'on recherche.

Dans tous les cas, il s'agit d'un problème « à N-corps » (le nombre d'atomes concernés), et les solutions sont atteintes par des méthodes mathématiques qui nécessitent l'emploi des ordinateurs. Le solide réel est simplifié ainsi que les lois des interactions en ce que l'on appelle un modèle. Cette démarche scientifique, aujourd'hui indispensable dans de nombreux domaines dont celui des matériaux, s'appelle la modélisation.

Pour les solides poreux, dont la structure est désordonnée, la modélisation revêt une importance encore plus essentielle que pour les solides ordonnés : le désordre des atomes lui-même, marqué de caractère aléatoire, est décrit par des méthodes numériques où l'on modélise des arrangements atomiques appropriés, souvent plusieurs types d'arrangements dont on doit ensuite pondérer les importances.

Associée à la modélisation, prend place l'indispensable étape de la validation. On applique la méthode à des solides simples et connus : si le calcul réalisé sur le modèle n'est pas en accord avec les propriétés mesurées, le modèle doit être modifié.

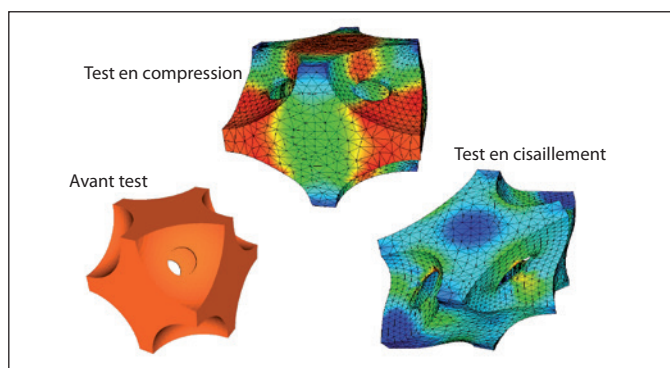


Figure 11

Mousses soumises à des tests en compression et en cisaillement.
Source : Matelys

taille des interconnexions, le taux d'interconnexion entre les bulles, pour arriver à une structure optimale et raisonner sur la performance globale de notre ensemble.

Au stade de l'utilisation finale, l'architecte raisonne en termes d'indicateur global, une seule valeur l'intéresse ; par exemple, s'il s'agit d'isolation acoustique, il veut savoir

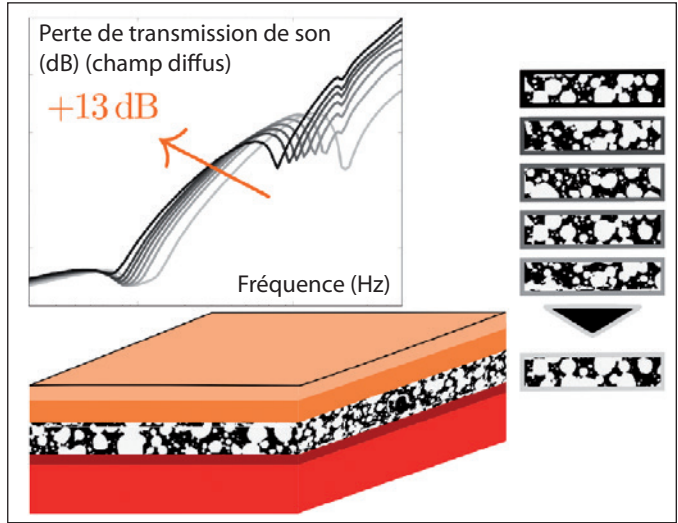
s'il a obtenu plus ou moins 13 décibels sur l'indice d'affaiblissement.

Le chimiste, avec les outils de la modélisation, dispose du lien entre cette propriété d'isolation et la microstructure du matériau utilisé. Il peut par conséquent construire la microstructure identifiée pour atteindre la performance souhaitée.

Figure 12

Propriétés acoustiques des multicouches.

Source : Matelys



4.3. Mousses et propriétés thermiques

Un exemple de traitement des propriétés thermiques est présenté sur la **Figure 13**. Sur une structure proche de la mélamine, on applique un gradient de température. La partie froide est représentée en bleu, la partie chaude en rouge ; on calcule comment se distribue le champ de température au sein de la cellule. La **Figure 13** illustre uniquement la partie conductivité thermique, qui est la plus spectaculaire, mais on pourrait également s'intéresser aux propriétés de convection

thermique et de rayonnement thermique, pour avoir l'ensemble des phénomènes dissipatifs thermiques.

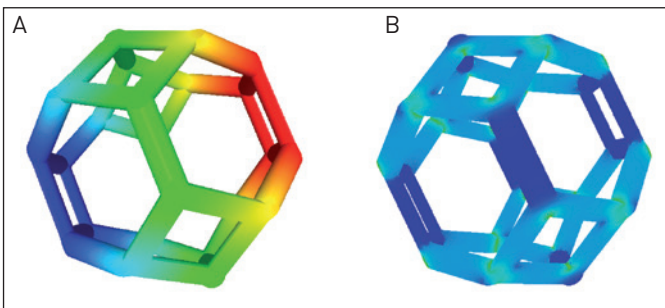
4.4. Écoulements et microstructures

Les matériaux utilisés, ou bien sur les réacteurs d'avion ou sur les trains à grande vitesse, sont souvent traversés par un écoulement ou situés à proximité de celui-ci. La propriété considérée est la perturbation de l'écoulement ou des ondes acoustiques, par la présence du matériau poreux. Diverses techniques permettent de lier cette propriété à la microstructure du matériau. Si un écoulement traverse une microstructure du matériau, toujours modélisée comme un ballon de football avec des ouvertures, on peut calculer comment l'écoulement est dévié, et montrer qu'à certains endroits l'écoulement est accéléré et à d'autres endroits ralenti.

Figure 13

Propriétés thermiques : champ de température (A), flux de chaleur (B).

Source : Matelys



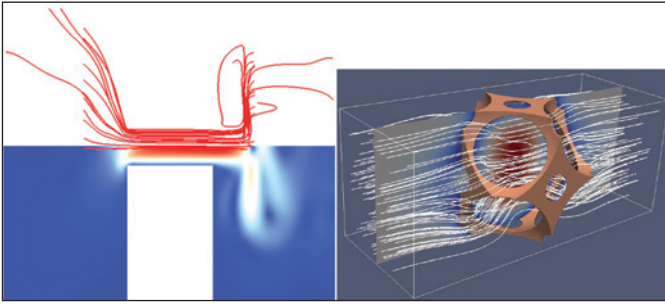


Figure 14

Écoulements et microstructures.
Source : Matelys
(logiciel LaBS)

On raisonne ainsi en termes de fonctionnalités tout en gardant le lien avec la microstructure du matériau. La **Figure 14** montre également un exemple de plaque per-

forée vue en coupe. On peut observer la modification des lignes de champ et déterminer l'influence du taux de perforation sur les performances de ce type de solution.

Vers une connexion des corps de métiers, pour des microstructures améliorées pour les transports

Les corps de métiers, qui utilisent des vocabulaires différents, se doivent au sein d'une même entreprise, ou d'un même projet, d'adresser les mêmes problématiques. Au travers des différents exemples analysés, il apparaît que la microstructure peut faire le lien entre ces corps de métiers en permettant d'établir, par son intermédiaire, des correspondances entre le procédé de fabrication et la fonctionnalité.