Fragilité des matériaux : causes et remèdes

Tanguy Rouxel (Tanguy.Rouxel@univ-rennes1.fr), LARMAUR, FRE-CNRS 2717, Université de Rennes 1, campus de Beaulieu, 35042 Rennes cedex

La fragilité et son contraire, la ductilité, ne sont pas des propriétés intrinsèques des matériaux. Le temps, au travers de la durée d'observation ou de la vitesse de sollicitation, est un facteur déterminant. La pression et la température sont d'autres paramètres importants. L'homme l'a souvent appris à ses dépens, en faisant naviguer des navires dans des eaux trop froides, leurs coques métalliques devenant fragiles. Aujourd'hui encore, cette problématique suscite de nombreux travaux dans les domaines du génie civil et de la métallurgie.

Un matériau est dit « fragile » lorsque la résistance qu'il oppose à l'initiation (à partir d'un défaut préexistant) et à la propagation d'une fissure – ou ténacité* – est faible. L'homme a su parfois tourner la fragilité des matériaux à son avantage, pour tailler des coins en silex et pour façonner des lames tranchantes en obsidienne⁽¹⁾ au paléolithique, ou encore pour extraire des blocs de pierre pour creuser des citernes dans l'antiquité (des pieux de bois introduits dans des failles étaient aspergés d'eau et le gonflement engendré provoquait l'ouverture des failles et l'avancée des fissures). C'est aussi la fragilité du verre qui permet au verrier de découper une plaque suivant un contour pré-défini à l'aide d'une simple rayure préalable. Cependant, la ductilité des matériaux est le plus souvent recherchée pour façonner des objets. L'homme s'est d'abord intéressé à l'argile et au cuivre, façonnables à température ambiante, puis à l'acier et au verre, ductiles à chaud. C'est l'écoulement du verre* à relativement basse température (dès 600°C pour le verre à vitre), autorisant la mise en œuvre par soufflage ainsi que les procédés de moulage et d'étirage, qui est à l'origine du formidable essor de cette famille de matériaux.

À toute surface correspond une énergie spécifique. Un matériau qui ne peut accommoder une sollicitation mécanique en se déformant – comme le ferait un matériau ductile – dissipe l'énergie par création de nouvelles surfaces en produisant des fissures et en se fracturant : c'est un

matériau fragile. C'est le cas du verre qui, sous charge concentrée ou à l'occasion d'un impact, donne naissance à de multiples fissures ou à des éclats sans engendrer de déformation permanente visible (on peut recoller les morceaux !).

La figure 1 illustre ces deux types de comportements, fragile et ductile, pour une expérience d'indentation courante, telle qu'elle est pratiquée pour évaluer la dureté des matériaux. Dans cette expérience, une pointe pyramidale à base carrée en diamant est amenée en contact avec la surface de l'échantillon et chargée pendant environ 15 s. Il en résulte une empreinte permanente, dont les dimensions reflètent la dureté, ainsi qu'un endommagement par fissuration (de petites fissures qui partent des coins de l'empreinte sont visibles en surface) et écaillage (cas des fortes charges). L'écoulement (au sens de l'apparition d'une déformation irréversible) est d'autant plus facile que l'énergie de liaison est faible. Inversement, la fragilité augmente lorsque la nature de la liaison change, de Van der Waals (cas des liaisons intermoléculaires dans les polymères) à métallique, à ionique et à covalente. Le verre de chalcogénures, constitué d'unités structurales très covalentes, répond à l'indentation par un endommagement mécanique important, se manifestant par des fissures radiales et un écaillage nettement visible sur la figure 1a. Dans les mêmes conditions d'indentation, le verre à vitre, présentant des liaisons interatomiques mixtes ioniques et covalentes, s'endommage beaucoup moins. Seules des fissures radiales

Figure 1 : Indentations réalisées à la surface de verres de différentes compositions à l'aide d'un diamant de forme pyramidale (indentation Vickers). a) Verre de chalcogénures à base de germanium et de sélénium, transparent dans l'infrarouge. b) Verre à vitre, principalement constitué de silice (70 %) et d'oxydes de calcium, de sodium et de magnésium. c) Verre métallique massif à base de zirconium. (Clichés : Jean-Pierre Guin et Vincent Keryvin, LARMAUR, Université de Rennes 1).

* Les termes suivis d'un astérisque sont définis dans le glossaire, p. 8.

(1) Verre rencontré sur les flancs des volcans et principalement constitué de silice.

sont visibles sur la figure 1b. Le verre métallique (fig. 1c), beaucoup moins fragile, se déforme plus aisément et offre donc une bonne résistance à la fissuration, même sous de fortes charges. Ainsi, fragilité et ductilité n'expriment que le résultat de la compétition permanente entre l'écoulement (au sens large : plasticité, viscosité*, fluage*) et la fissuration, auxquels un matériau ou une structure est confronté pendant sa mise en forme (injection-extrusion, emboutissage, fonderie, etc.) et auxquels il doit faire face pendant sa durée de vie en service.

La transition fragile-ductile, qui revêt une importance pratique considérable, a été très étudiée dans le cas des métaux. Chez ceux-ci, l'apparition de ductilité lorsqu'on élève la température coïncide avec l'activation de la mobilité des dislocations* et s'accompagne d'une élévation apparente brutale de la ténacité. La température de transition est alors contrôlée par le taux de nucléation de sources de dislocations au voisinage du défaut le plus sévère (microfissure) et/ou par la vitesse à laquelle les dislocations s'éloignent du défaut, conduisant le plus souvent à son émoussement. Au-dessus de cette température, la contrainte d'activation des dislocations est plus faible que la contrainte de rupture, si bien que le matériau se déforme et ne rompt pas. Cette température est proche de 425°C pour le silicium, 160°C pour le tungstène, -150°C pour un acier doux (teneur en carbone inférieure à 0,4 %).

Dans ce qui suit, l'accent est mis sur les matériaux pour lesquels la relaxation des contraintes à la source de l'apparition de ductilité procède par écoulement visqueux ou diffusionnel de la matière, et en particulier sur le cas du verre, qui est un modèle de matériau fragile à l'ambiante.

Une question de température et de vitesse de déformation

Temps de relaxation et nombre de Déborah

Le verre à vitre est fragile, cassant, quasiment parfaitement élastique à l'ambiante, mais il commence à s'écouler de manière visible au-dessus de sa température de transition vitreuse*. Toutefois, si l'on impose une déformation rapide à cette même température, le verre se fracture de manière fragile : la matière n'a pas eu le temps de se réorganiser pour accommoder la sollicitation imposée. Ainsi, c'est le comportement à une température donnée, eu égard à une vitesse de chargement ou un temps d'observation qui importe, comme cela est illustré schématiquement dans la figure 2. Généralement, la vitesse considérée se situe à l'échelle de l'activité humaine. Mais elle peut être parfois plus rapide (mise en forme par superplasticité à grande vitesse ou par explosion, comportement aux chocs) ou plus lente (échelle de la géologie : tectonique des plaques, évolution des cratères).

Le rapport entre le temps de relaxation caractéristique (τ_r) (voir encadré, p. 8) du matériau à la température T et le temps d'observation (τ_0) gouverne le comportement. Ce rapport porte le nom de nombre de Déborah, $D = \tau_r / \tau_0$, en référence à un cantique rapporté dans l'Ancien Testament (Livre des Juges, ch. 5, verset 5) et attribué à la prophétesse Déborah, selon lequel « ...les montagnes s'écoulèrent devant le Seigneur... ». Le sens de cette phrase est double : d'abord tout s'écoule, même les montagnes ; mais Déborah ajoute « devant le Seigneur » car, aux yeux des hommes,

le temps d'observation est trop court pour déceler un quelconque changement.

Le nombre D peut donc s'interpréter aisément : si $D < 1$, le comportement est ductile et l'écoulement est éventuellement observé ; si $D > 1$, alors la cinétique des déplacements microscopiques est insuffisante et le comportement gagne en fragilité. Pour un matériau cristallin, la distinction entre les états solide et liquide est très claire, tandis qu'elle est nettement moins évidente pour un verre, lequel est souvent perçu comme un solide de grande viscosité. Dans ce dernier cas, le paramètre D permet d'apprécier l'état dans lequel le matériau se trouve : un solide correspond à $D > 1$, tandis que pour un liquide $D < 1$. En construction mécanique ou dans le domaine du génie civil, le paramètre τ_0 peut être remplacé par la durée de vie en service.

Un modèle rhéologique viscoélastique linéaire élémentaire (voir encadré, p. 8), supposant que le comportement est simplement le résultat de la combinaison de contributions élastique et visqueuse, autorise une estimation grossière rapide de τ_r : $\tau_r = \eta / \mu$, où η est le coefficient de viscosité linéaire (rapport entre une contrainte et la vitesse de déformation qu'elle induit) et μ le module élastique de cisaillement (rapport entre une contrainte de cisaillement et la distorsion angulaire γ engendrée). À de rares exceptions près, η et μ décroissent quand T augmente, mais l'influence de la viscosité, qui varie de plusieurs ordres de grandeur sur quelques dizaines de degrés, l'emporte très largement. On trouve ainsi (tableau 1) que pour le bitume à -5°C, $\tau_r \sim 10$ s, tandis que $\tau_r \sim 0,1$ s pour le verre à vitre à 600°C et $\tau_r \sim 1$ jour pour ce même verre à 500°C. L'influence de la température sur la valeur de τ_r est représentée sur la figure 3 pour des matériaux variés, pour lesquels il existe des données de viscosité et d'élasticité à chaud. La transition entre un comportement fragile et un comportement ductile est souvent assez brutale et se situe au voisinage de la transition vitreuse (température T_g) pour un verre. On observe que le temps de relaxation correspondant à la transition vitreuse est de l'ordre de la minute pour la plupart des matériaux étudiés (fig. 3). Le verre basaltique, avec une composition proche de celle d'une lave volcanique, s'écoule au-dessus de 750°C ; en dessous de 600°C, le temps de relaxation atteint plusieurs millénaires et la lave peut être considérée comme figée.

Figure 2 : Ainsi que le démontre le couplage entre la température et la vitesse de sollicitation (ou inversement le temps d'observation), fragilité et ductilité ne sont pas des propriétés intrinsèques des matériaux et des structures. Il est généralement possible de réduire la fragilité d'un matériau, soit en élevant la température, soit en diminuant la vitesse de sollicitation.

Figure 3 : Influence de la température sur le temps de relaxation caractéristique. La transition vitreuse correspond conventionnellement à une viscosité de $10^{12,6}$ Pa.s. Les données rassemblées sur cette figure semblent indiquer qu'elle se manifeste pour un temps de relaxation d'environ 10^2 s.

À propos de l'écoulement du verre des vitraux des cathédrales...

Le cas du verre à vitre est intéressant, car on peut décrire un vaste domaine de températures, du solide viscoélastique au liquide (surfondu). Au voisinage de T_g , $\eta \sim 10^{12,6}$ Pa.s (valeur conventionnelle), tandis que $\mu(T_g) \sim \mu(20^\circ\text{C})$ (μ vaut respectivement 29,3 et 27,2 GPa à 20 et 562°C), si bien que $\tau_r \sim 37$ s à T_g , c'est-à-dire un temps à l'échelle de la durée des essais mécaniques réalisés classiquement au laboratoire. À l'ambiante, le temps de relaxation caractéristique du verre, prédit par extrapolation à 20°C des courbes de viscosité et d'élasticité obtenues au-dessus de 530°C , serait au moins de quelques dizaines de milliers d'années (une valeur de l'ordre de 10^{23} années a été avancée récemment). L'écoulement du verre à vitre à l'ambiante est donc insignifiant ; cela s'applique (contrairement à une idée reçue) aux vitraux de cathédrale, dont le fluage est d'ailleurs beaucoup plus lent que celui du plomb servant à les serrer (pour une taille de grains de l'ordre du mm, on trouve pour celui-ci une constante de temps de quelques siècles).

Tableau 1 : Valeurs des constantes de temps de relaxation caractéristiques, $\tau_r = \eta / \mu$. Estimations grossières sur la base d'un modèle rhéologique simple (Maxwell), en utilisant les données d'élasticité et de viscosité de la littérature ou, à défaut de coefficient de viscosité, d'extrapolation à partir des données de fluage des matériaux. (ns : 10^{-9} s, h : heure, j : jour, a : année).

Les enrobages routiers : des matériaux high-tech pour conditions extrêmes

Remarquons que pour les liants bitumineux, matériaux viscoélastiques complexes adoptant un comportement voisin de celui des polymères amorphes, les valeurs de τ_r indiquent qu'un même liant peut manifester un comportement élastique, éventuellement fragile, au cœur de l'hiver, tandis qu'un comportement ductile (fluide visqueux) apparaît dès que les températures se font plus douces. Ainsi, dans les régions les moins tempérées du globe (Sibérie, Finlande, Alaska...), il n'existe pas encore d'enrobages routiers bitumineux capables de

résister tout à la fois à la fissuration ou au craquellement en hiver, lorsque la température descend en dessous de -20°C , et à la déformation viscoplastique en été, quand la température dépasse 35°C . Dans ces régions, il faut donc refaire les enrobages routiers chaque année. La température de transition fragile-ductile des bitumes se situe généralement entre 20 et 7°C . La proximité de cette température avec la température ambiante fait qu'un enrobage routier qui se fissure au passage d'un poids lourd peut parfois guérir (phénomène d'autoréparation) sur la période séparant deux passages successifs.

Ductilité : vers la mise en forme des matériaux

La figure 3 indique aussi que même dans le cas des matériaux les plus fragiles à l'ambiante, tels que les verres et les céramiques, on peut trouver un domaine de températures exploitable pour tenter une mise en forme de pièces par déformation à chaud. L'exemple de la zircone (ZrO_2), largement utilisée aujourd'hui pour la fabrication d'implants biocompatibles, de filtres, de billes ou d'outils coupants, est frappant : dès 1400°C , ce matériau peut se prêter à une mise en forme par emboutissage, et manifeste un comportement

Matériau	$\tau_r = \eta / \mu$
Verre médiéval (vitraux des cathédrales) à $\sim 20^\circ\text{C}$	2×10^{23} a
Manteau terrestre	10^6 a
Plomb fondu – Taille des grains = 1 mm, à $\sim 20^\circ\text{C}$	500 a
Glace à -98°C	120 a
Verre à vitre à 400°C	32 a
Plomb extrudé – Taille des grains = 50 μm , à $\sim 20^\circ\text{C}$	5 a
Verre à vitre à 500°C	1 j
Glace à -5°C	1 j
Cuivre à $\sim 20^\circ\text{C}$	10 h
Matériaux composites $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ à 1600°C	1 h
Bitume à -5°C	10 s
Verre à vitre à 600°C	0,1 s
Bitume à 40°C	1 ms
Résine (époxy) à $\sim 20^\circ\text{C}$	1 ms
Eau à $\sim 20^\circ\text{C}$	1 ns

Glossaire

Verre

Solide non cristallin (amorphe) présentant le phénomène de transition vitreuse. Matériau obtenu par trempe d'un liquide, c'est-à-dire par figeage de la structure atomique désordonnée.

Coefficient de viscosité

Coefficient traduisant la relation de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement (σ) et la vitesse de distorsion angulaire ($d\gamma/dt$) résultante : $\sigma = \eta \, d\gamma/dt$ (loi de la viscosité linéaire ou newtonienne). Par abus de langage, η est appelé viscosité.

Transition vitreuse

Domaine de température centré sur T_g , qui marque le passage entre le liquide et le verre (liquide surfondu figé) et correspondant sensiblement à une viscosité de $10^{12,6}$ Pa.s ($10^{13,6}$ poises).

Superplasticité

Aptitude que présentent certains matériaux polycristallins à pouvoir être déformés de plus de 100% en traction. Il s'agit généralement de matériaux denses à grains fins.

Ténacité

La ténacité est la valeur critique du facteur d'intensité des contraintes au voisinage d'un défaut (entaille, inclusion, microfissure, etc.) ou d'un front de fissure, à laquelle la fissure progresse rapidement, entraînant une rupture catastrophique dans la plupart des cas. La ténacité est une mesure de la fragilité des matériaux, qui s'exprime en $\text{Pa.m}^{1/2}$.

Dislocation

Défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. La mobilité des dislocations est à l'origine de la déformation plastique des matériaux cristallins.

Fluage

Évolution de la géométrie d'une structure sous charge constante. Phénomène thermiquement activé.

superplastique (possibilité d'obtenir plus de 100 % d'allongement). Il est néanmoins nécessaire que la taille des grains soit suffisamment fine et que la microstructure soit dense et homogène.

Ce qu'il ne faut pas faire...

De manière générale, pour qu'un matériau polycristallin n'adopte pas un comportement fragile, il faut éviter la précipitation d'inclusions dures et fragilisantes et faire en sorte que la taille des grains soit suffisamment petite, typiquement en deçà de 0,1 mm. Les échantillons d'acier prélevés sur l'épave du Titanic (naufrage du 2 avril 1912) en 1985 par une équipe d'investigation franco-américaine ont révélé des teneurs en soufre et en phosphore très au-dessus des teneurs habituelles des aciers modernes, avec un rapport manganèse/soufre de 7 contre 200 pour les aciers courants d'aujourd'hui. S'ajoute à la déficience en manganèse, élément améliorant la ductilité, une taille des grains deux fois plus grande que celle qui est préconisée. Certes, ce navire d'exception (270 m de longueur pour 46 000 tonnes) a « malencontreusement » percuté à pleine vitesse un iceberg de 3 à 6 fois son poids. Mais la situation fut grandement aggravée par la méthode de rivetage utilisée pour assembler les tôles, avec des trous réalisés par choc à froid, ainsi que par la fragilité de l'acier employé (y compris pour les rivets, faits d'un acier ordinaire contenant environ 9 % de précipités de silicates de fer), dans lequel de nombreuses inclusions de sulfure de manganèse (MnS) ont été observées. Les

résultats d'essais de résistance aux chocs mécaniques (essais « Charpy ») sont clairs : la température de transition fragile-ductile de l'acier choisi pour réaliser la coque du Titanic est d'environ 32°C, tandis qu'elle vaut sensiblement -27°C pour les aciers modernes. Sachant que l'eau était à -2°C la nuit du naufrage, autant dire que la coque de ce paquebot s'apparentait à une coque de verre ! D'ailleurs, le frottement tangentiel du flanc tribord immergé de la coque sur l'iceberg a produit une fissure étroite sur 76 m de long, se propageant de rivet en rivet, comme on déchire une feuille de papier en suivant les pointillés, et présentant donc des caractéristiques proches de celles d'une rupture fragile (fissure étroite avec peu ou pas de déformation permanente).

Bien que de nombreuses structures artificielles produites au cours des deux derniers siècles (ponts, navires, etc.) aient été ruinées d'un seul coup un jour de grand froid en raison de la fragilité de l'alliage utilisé, l'homme continue d'apprendre à ses dépens ce que « fragilité » veut dire. Ainsi, dans l'explosion de la navette spatiale américaine Challenger, le 28 janvier 1986, après seulement 1 minute de vol, la fragilité du joint torique assurant l'étanchéité de l'un des réservoirs fut-elle mise en cause par R.P. Feynman⁽²⁾, qui montra que ce joint perdait sa plasticité (ductilité) lorsqu'on le plongeait dans de l'eau glacée. Plus près de nous, le 18 mars 2002, le Lake Carling, un vraquier transportant 25 000 tonnes de minerai de fer, manqua de sombrer pendant la traversée du golfe du St-Laurent au Québec, après qu'une fissure de 8 mètres de longueur

Élasticité, viscosité, cinétique de relaxation et nombre de Deborah

Le comportement élastique correspond à la proportionnalité entre la déformation et la contrainte. La viscosité pure se manifeste par la proportionnalité entre la vitesse de déformation et la contrainte appliquée. Le coefficient de viscosité s'obtient en mesurant la vitesse de déformation pour une contrainte appliquée donnée. La cinétique de relaxation de la contrainte est déterminée en imposant une déformation et en suivant la décroissance de la contrainte avec le temps.

Une façon simple d'estimer le temps de relaxation caractéristique consiste à exprimer la déformation totale comme la somme d'une composante élastique (module d'élasticité en cisaillement μ (Pa)) et d'une composante visqueuse (viscosité η (Pa.s)), représentées schématiquement par un ressort et un amortisseur en série : c'est le modèle dit de Maxwell.

À l'instant t , en utilisant le modèle de Maxwell, le rapport de la contrainte à la contrainte initiale vaut $\exp(-t/\tau_r)$, où τ_r est le temps de relaxation caractéristique du processus défini par : $\tau_r = \eta/\mu$.

On peut donc estimer τ_r , soit directement à partir d'un essai de relaxation, soit à partir des valeurs de la viscosité et du module de cisaillement.

Le nombre de Deborah (D) permet de déterminer rapidement si, à l'échelle de la durée d'observation retenue (τ_0), la matière semble figée ou au contraire en mouvement, et donc si le matériau adopte un comportement en apparence fragile ou ductile :

$$D = \tau_r/\tau_0.$$

La ductilité correspond à $D < 1$, la fragilité à $D > 1$.

Figure 4 : Habitat antisismique innovant, construit par assemblage d'éléments, capable d'accommoder un mouvement latéral périodique de forte amplitude par rotation et glissement des éléments les uns par rapport aux autres. Le bâtiment traditionnel (a) constitué de blocs assemblés de manière rigide se fissure, tandis qu'en autorisant des mouvements relatifs entre les blocs (b) l'édifice gagne en souplesse et sa résistance à l'endommagement augmente. (Dyne-Concrete Life, Documentation Technique, Sekisui House, Japon – www.sekisuihouse.com)

soit apparue au niveau de l'une des cales. De nouveau, la température de transition fragile-ductile de l'acier, identique à celle du Titanic, a été incriminée. Cette situation fut aggravée par un chargement mal équilibré ayant entraîné une flexion excessive de la coque, ainsi que par une température ambiante en dessous de zéro.

À l'inverse, une ductilité excessive peut aussi avoir des conséquences désastreuses sur la tenue en service. Par exemple, avec une taille de grains (d) millimétrique typique de celle du plomb élaboré par coulée, la constante de temps de relaxation à l'ambiante est de plusieurs siècles. Mais si la taille de grains vaut quelques dizaines de microns, ainsi que c'est le cas pour les conduites d'eau en plomb « mou » réalisées par extrusion à l'époque victorienne (99,5% de plomb avec ajouts d'antimoine et d'étain), alors le matériau flue 1000 fois plus vite et τ_r est ramené à quelques années. La vitesse de déformation croît lorsque la taille des grains diminue et est typiquement proportionnelle à σ^n/d^p . Les valeurs des exposants n et p, classiquement entre 1 et 3, renseignent sur le mécanisme de déformation. Cette description reposant sur la taille des grains trouve néanmoins une limite physique à l'échelle atomique, soit, typiquement, en dessous d'une dizaine de nanomètres.

L'ingéniosité de la nature et celle des constructeurs

La nature a souvent trouvé des solutions ingénieuses au problème de la fragilité : le squelette osseux, relativement fragile, est protégé par de la matière vivante souple et résistante aux chocs. Dans le cas de la boîte crânienne, peu protégée, les sutures entre les différents os constituant le crâne sont des dispositifs de déviation de fissures qui augmentent l'énergie

nécessaire à la fissuration et réduisent donc la fragilité. Dans le cas de l'œuf, au contraire, la fragilité est recherchée afin de faciliter l'éclosion. La coquille est donc monobloc. La structure fibreuse des arbres et celle en feuillets des coquillages, sont d'autres remèdes efficaces à la fragilité, par dissipation de l'énergie apportée (chocs, agression) le long des interfaces fibres-matrice (bois) ou dans des plans de clivage facile (coquille d'huître). Les hommes s'inspirent de plus en plus des solutions trouvées par les organismes vivants et inventent aussi des matériaux et des structures originaux. Le cas des matériaux composites à fibres ou des structures en nids d'abeilles utilisés dans l'aéronautique en est une bonne illustration.

Afin d'accroître la vitesse de mise en forme des tôles en alliages légers (avions, voitures, emballages), les métallurgistes recherchent des matériaux ductiles mais résistants, et des procédés de mise en forme par déformation plastique rapide. Récemment, des céramiques à grains très fins, de dimension nanométrique, ont été développées afin de réduire la fragilité et d'envisager une mise en forme par superplasticité à des températures compatibles avec les outils industriels actuels. À l'échelle macroscopique, des structures métalliques hélicoïdales ont été imaginées pour accroître la « ductilité » (ou plus précisément la souplesse) d'habitats en béton construits dans des zones à risques sismiques, en leur permettant d'accommoder des mouvements brusques en prévision de tremblements de terre. Au Japon, des architectes et des ingénieurs du bâtiment travaillent à la mise au point d'une architecture d'habitat antisismique révolutionnaire avec une ossature composite constituée de blocs capables de glisser et de pivoter les uns par rapport aux autres (fig. 4), à la manière des grains dans les matériaux superplastiques. ■

En savoir plus...

Sur la transition fragile-ductile

- 1 • F. Louchet et Y. Bréchet, "Physics of toughness", *Phys. Stat. Sol. (a)* **131** (1992) 529-537.
- 2 • T. Rouxel et J.-C. Sangleboeuf, "The brittle to ductile transition in a silico-soda-lime glass", *J. Non-Cryst. Sol.* **271** (2000) 224-235.

Sur la rhéologie du verre et sur le nombre de Deborah

- 3 • A.K. Varshneya, *Fundamentals of inorganic glasses*, Academic Press Inc., New-York, London (1994). Voir aussi : M. Reiner, "The Deborah Number", *Phys. Today*, **62** (1964) 46.
- 4 • E. Zanotto et P. K. Gupta, "Do cathedral glasses flow? - Additional remarks", *Am. J. Phys.* **67** (1999) 260-262.

Sur les liants bitumineux

- 5 • Jean-François Corté et Hervé Di Benedetto, *Matériaux routiers bitumineux - 1 : Description et propriétés des constituants*, chapitre 3 : « Les liants hydrocarbonés », Hermes-Lavoisier (2004), pp. 39-176.

Sur les catastrophes maritimes et l'explosion de la navette spatiale américaine Challenger

- 6 • S. Hill, "The mystery of the Titanic: A case of brittle fracture?", *Materials World* **4** (1996) 334-335. Voir aussi : www.si.edu/resource/faq/nmah/titanic.htm
- 7 • R. P. Feynman, *What do you care what other people think? Further adventures of a curious character*, Bantam Doubleday Dell Pub (1992).

Sur les modules d'élasticité à chaud et sur le fluage et la superplasticité des matériaux à grains fins

- 8 • T. Rouxel, « Superplasticité », dans *Nanosciences - Tome 2, Nanomatériaux / Nanochimie*, sous la direction de M. Lahmani, C. Bréchnignac et P. Houdy (Belin, 2006).