

Innovations et perspectives : le verre dans tous ses éclats

Rencontre du Café des techniques du jeudi 21 octobre 2004 au musée des Arts et Métiers
A l'initiative de l'AFAS, en collaboration avec l'Association des amis du musée des Arts et Métiers
Avec le soutien de la délégation à la Recherche et à la Technologie d'Ile-de-France

avec la participation de

Hervé Arribart, directeur scientifique de Saint-Gobain Recherche

Jean-Pierre Houdaer, ancien directeur général de l'Institut du verre

Bernard Pictet, verrier

René Vacher, directeur de recherche CNRS, Laboratoire des verres, CNRS-Université de Montpellier II

Rencontre animée par **Nathalie Milion**, journaliste scientifique

Pourquoi cette rencontre ?

Verre soufflé, taillé, filé, feuilleté, coloré : Il est né de la rencontre du sable et du feu. Sous l'effet de la chaleur, le mélange à base de silice, de soude et de chaux devient visqueux, malléable puis liquide. Il prend alors toutes sortes de formes et de fonctions. Il devient œuvre d'art dans les mains des maîtres verriers. Il inspire les architectes qui jouent tour à tour avec sa transparence et son éclat. Il se plie aux exigences des constructeurs automobiles. Il se transforme en emballage pour aliments et médicaments ou sert d'écran à un parfum. Il corrige la vue, il transporte la lumière sous la forme de fibre optique. Le verre n'a cessé d'évoluer pour relever de nouveaux défis technologiques. Aujourd'hui, il pénètre dans la sphère des services : auto-nettoyant, anti-pluie, capable de passer de la transparence à l'opacité et inversement. Il multiplie ses compétences et développe des propriétés étonnantes. Découvrons un matériau qui, sous son apparente fragilité, cache des ressources encore inconnues. Le débat était précédé d'une projection du documentaire Du sable à la lumière... le verre, écrit et réalisé par Annie Chevally (co-production Arte France et Boyard Production, 2003).

Présentation

N. Milion :

Bonsoir et merci d'être venus encore une fois aussi nombreux à ce Café des techniques organisé par l'AFAS et le musée des Arts et Métiers.

Nous allons parler ce soir du verre... autour d'un verre, après avoir regardé, en guise d'introduction, le film *Du sable à la lumière... le verre*, réalisé par Annie Chevally. J'aimerais que nous lui fassions une ovation pour son magnifique travail. (*Applaudissements*). Peut-on se procurer la cassette de ce film ?

A. Chevally :

Ce film a été réalisé pour une soirée «Thema» d'Arte, programmée à 23h45 dans l'optique actuelle de la culture - nous sommes dans le mouvement de la culture et de l'éveil ! Je vous conseille de passer par le site d'Arte qui vous donnera la possibilité de vous procurer la cassette du film.

Le point sur lequel je voulais inciter le public potentiel de ce film à réagir est effectivement l'éveil d'une réflexion sur le matériau qu'est le verre. C'est un matériau magnifique puisqu'il ne fait que se transformer et répond à tous les rêves et à toutes les intelligences humaines. Je trouvais que ce parallélisme entre un matériau et l'homme était intéressant à développer. Ce serait donc bien que vous fassiez un petit signe à Arte pour manifester votre envie d'avoir ce travail entre vos mains.

N. Milion :

Nous parlons de verre aujourd'hui et j'ai pu relever, comme vous, quelques mots qui me font rêver dans ce film : on y parle de transparence, de brillance ; on y parle pratiquement de pierre philosophale avec la transmutation. Le verre est à la fois du liquide et du solide, du pur et de l'impur. C'est un matériau maniable, mais

capricieux. Pour nous en parler, nous avons convié quatre spécialistes, que je vais vous présenter.

A tout seigneur tout honneur, nous allons commencer par un verrier. Bernard Pictet, vous possédez un atelier à Paris et vous êtes en quelque sorte au verre ce que la haute couture est à la mode. Vous appliquez ce matériau à l'architecture et à la décoration, et pas uniquement comme un matériau de remplissage et de parement. On verra avec vous qu'il peut prétendre à d'autres applications et je renvoie nos auditeurs à votre magnifique site Web (www.bernardpictet.com), qui met en perspective vos œuvres car on peut vraiment parler d'art et d'artisanat - vous insistez d'ailleurs sur le terme d'*ouvrage*.

A côté de vous, un scientifique, René Vacher, universitaire et physicien du verre. Votre spécialité est l'optique des solides, à l'université de Montpellier II. Dans un instant, vous nous donnerez la définition précise du verre. Nous verrons qu'il est différent du cristal, que ses propriétés sont infinies, qu'on ne les connaît donc pas toutes encore aujourd'hui, et qu'il reste beaucoup à apprendre.

Autre scientifique, physicien d'origine, Hervé Arribart, que nous avons vu dans le film d'Annie Chevallay, est directeur scientifique de Saint-Gobain, ex-Manufacture royale des glaces chère à Colbert. Saint-Gobain est aujourd'hui le premier verrier au monde en termes de volume de production. Vos deux marchés principaux sont l'automobile - vous équipez une voiture sur deux en Europe -, et le bâtiment, avec, pour anecdote, la Pyramide du Louvre et la recherche sur un verre extrêmement transparent, ou bien encore des aspects un peu plus techniques comme les hublots pour le nucléaire. Nous verrons avec vous les différentes utilisations de ce matériau.

Jean-Pierre Houdaer, vous avez dirigé, jusqu'au 1^{er} juillet 2004, l'Institut du verre (le centre technique du verre pour la France), et également Prover, qui est le centre professionnel de formation des verriers français. L'Institut du verre existe depuis 1945 et est le «lieu de rencontre et d'échange» sur le matériau verre pour les scientifiques et professionnels du verre. C'est également un service «veille» et un centre de documentation concernant ce matériau, ainsi qu'un service de «conseil et expertise». Enfin, vous éditez la revue *Verre* et vous représentez les verriers français dans de nombreuses organisations françaises et internationales.

Nous allons commencer tout de suite par le cœur de ce Café des techniques. Vous le savez, c'est vous, le public, qui posez les questions. Qui veut se lancer pour la première question ?

Questions

*Peut-on définir le verre de façon tout à fait scientifique ?
Qu'est-ce que le verre et qu'est-ce qui fait les propriétés si multiples du verre ?*

R. Vacher :

Les spécialistes ne sont pas complètement d'accord sur une définition précise. Je vais en donner une qui n'engage donc que ma propre responsabilité.

Un verre est un matériau solide formé à partir d'un liquide refroidi rapidement. Le verre a à l'évidence toutes les propriétés physiques d'un solide : compressibilité, module de cisaillement, etc. Pour un physicien, c'est donc un solide. Néanmoins, c'est un matériau obtenu à partir d'un liquide par une trempe rapide.

Si vous mettez de l'eau dans le bac à glaçons de votre réfrigérateur et que vous placez celui-ci dans le freezer, le liquide se refroidissant lentement, l'eau a le temps de former un cristal et vous obtenez un matériau cristallisé.

Si au contraire vous faites chauffer un peu d'eau et de sucre dans une casserole jusqu'à ce que ce dernier soit fondu, puis que vous les refroidissez rapidement, vous formez du caramel et là, vous avez fait un verre.

La définition est donc vraiment pour moi : «un liquide trempé rapidement».

Sur des représentations extrêmement simplifiées, vous pouvez voir : la structure organisée d'un cristal, par exemple le sulfure d'arsenic ; puis, exactement la même composition chimique, mais qui, au lieu de cristalliser lentement et de former une structure régulière, a formé un verre de sulfure d'arsenic ; enfin, une image d'un verre de silice, produite par une simulation numérique : les gros atomes de silicium et les petits atomes d'oxygène sont dans un état désordonné, alors que, dans un cristal de quartz, vous auriez des atomes de silicium et d'oxygène parfaitement rangés dans des plans. Les petites boules blanches sont des blocs OH qui se sont attachés à la structure du silicium quand on a introduit un peu d'eau.

Quelle est la différence entre le verre et le cristal ?

R. Vacher :

La différence fondamentale est que, du point de vue atomique, le cristal est ordonné - les atomes sont rangés très soigneusement sur un réseau - alors que, pour un liquide et aussi pour un verre, les atomes sont dans une position désordonnée.

Quand vous fabriquez du cristal, quel est le procédé pour aligner les atomes par rapport à une matière amorphe ?

R. Vacher :

Quand on fabrique un cristal, le procédé consiste simplement à aller lentement pour laisser aux atomes le temps d'aller prendre la position qui leur permet de s'organiser.

Vous devez faire lentement un refroidissement rapide.

R. Vacher :

Je crois qu'il y a un malentendu. Quand je parle de

crystal, je parle de *solide cristallisé* et non pas de ce que vous appelez du cristal, qui est un verre au plomb.

Je parlais d'un verre en cristal par rapport à un verre en verre.

R. Vacher :

Un verre en cristal est simplement un verre dans lequel on a mis une quantité importante d'oxyde de plomb.

J.-P. Houdaer :

Pour avoir droit à l'appellation «cristal», le verre doit contenir au minimum 24 % d'oxyde de plomb, et plus de 30 % pour l'appellation «cristal supérieur».

R. Vacher :

Mais sur le plan de la physique, c'est un verre.

Pour moi, le cristal est un verre comme les autres, la seule différence étant qu'il contient de l'oxyde de plomb.

Quelles différences obtient-on en ajoutant du plomb ? Pourquoi le cristal est-il considéré comme une matière plus noble que le verre ordinaire ?

R. Vacher :

L'ajout de plomb produit plusieurs différences. D'une part, les atomes de plomb sont des atomes lourds, donc on obtient une matière plus dense. D'autre part, les propriétés optiques de ce verre sont différentes - son indice de réfraction est plus élevé du fait que les atomes de plomb sont plus lourds - et par conséquent, il se comporte différemment vis-à-vis de la lumière, ce qui lui donne une apparence différente.

J.-P. Houdaer :

On peut ajouter la sonorité du cristal, qui est une propriété particulière.

L'appellation «cristal» a été inventée par un Anglais au XVIII^e siècle, par analogie avec le cristal de roche dont il avait l'apparence. Mais c'est du verre.

Que faites-vous subir au verre pour qu'il supporte les chocs thermiques, par rapport aux verres qui ne les supportent pas?

R. Vacher :

C'est une question de composition et de conductivité. Ce qui fait qu'un verre se casse quand vous le chauffez, c'est le fait que vous le chauffez localement. Quand vous le posez sur un objet qui le chauffe, la chaleur se communique directement au fond du verre et pas sur les côtés si le matériau n'est pas suffisamment conducteur. Des contraintes se créent alors parce qu'une partie se dilate et pas l'autre, et le verre casse. Il faut donc augmenter la conductivité thermique du verre, entre autres en introduisant des composants qui rendent le matériau plus conducteur.

Qu'introduisez-vous ?

J.-P. Houdaer :

Pour réduire le coefficient de dilatation, les verriers introduisent dans la composition verrière des éléments tels que le bore par exemple (c'est le cas dans le verre appelé «Pyrex»).

Les verres de type vitrocristallin contiennent un grand nombre d'éléments et l'on arrive à des coefficients de dilatation très faibles. Un coefficient de dilatation faible permet de passer du chaud au froid sans que le verre casse. Nous avons aujourd'hui des vitrocristallins qui tiennent à 1000 °C d'écarts de température, ce qui est considérable.

N. Milion :

M. Arribart, pour des hublots de centrale nucléaire, on monte jusqu'à combien en température ?

H. Arribart :

Les hublots de centrale nucléaire ne sont pas faits pour fonctionner à température très élevée.

Pour revenir aux matériaux dont parlait Jean-Pierre Houdaer, qui ont des coefficients de dilatation thermique très faibles, il existe ce que nous appelons des vitrocéramiques, qui viennent encore compliquer les choses sur le plan des définitions de structure, puisque comme leur nom l'indique, ce sont à la fois des verres et des matériaux qui contiennent des cristaux. L'exemple le plus courant est celui des tables de cuisson des cuisinières modernes qui ont cet aspect ultralisse qui fait leur succès. Ils ont l'apparence des verres : on voit au travers, notamment lorsque la plaque en dessous se met à rougir. Mais ce n'est qu'une apparence car ces matériaux sont en fait des matériaux composites. Ils sont réalisés à partir de verre mais subissent un traitement thermique qui fait que, partiellement du moins, un phénomène de cristallisation se produit. Ce phénomène est très maîtrisé et, au final, on a affaire à un matériau dont la matrice est du verre, avec, à l'intérieur, une multitude de petites inclusions qui sont des cristaux.

R. Vacher :

Avant que nous quittions le domaine de la structure des verres, je voudrais insister sur un point. Revenons à la représentation d'un verre simple avec des atomes d'arsenic et des atomes de soufre. Si l'on va vers une composition chimique plus complexe, par exemple un verre dans lequel on a mélangé de la silice avec de la soude, voici ce qu'on obtient : je veux surtout insister sur le fait que dans un verre, la structure des différents composants est intimement mêlée. Il ne s'agit pas, par exemple pour des verres d'oxydes, de petits domaines avec de la silice et de petits domaines avec de l'oxyde de bore ou de sodium, mais d'un oxyde global de silice, bore et sodium.

Le mélange est donc intime - peut-être parlerons-nous plus tard des verres de confinement pour les matières nucléaires où l'oxyde d'uranium, ou autres, est intégré

strictement à la surface et pas du tout enfermé dans un verre : c'est un constituant de l'oxyde global.

Un autre point est la possibilité de faire varier les propriétés dans des gammes infinies. Quand on fait pousser un cristal, le cristal pousse pour certaines compositions bien précises et pas pour d'autres. Si l'on rajoute un peu plus d'un constituant, on trouvera ce constituant en excès quelque part car il ne s'incorpore pas à la structure. Du fait de la structure désordonnée, on peut fabriquer des verres dans des gammes de composition très étendues, avec, par conséquent, des propriétés physiques et chimiques extrêmement diverses.

Je fais des objets avec du verre sécurit ; je casse du verre et je recompose ensuite des volumes à partir de petits morceaux de matériaux. J'aurais aimé savoir s'il est possible de retremper ce verre une fois remodelé pour avoir un objet d'une seule pièce, mais avec l'aspect du verre sécurit ?

B. Pictet :

Vous voulez dire que vous cassez un verre sécurit, qui devient une pluie de petits éclats, puis que vous en remplissez un moule.

Non, je les colle les uns sur les autres sur une surface plane. Tous les volumes sont possibles, et ce que j'aimerais savoir, c'est s'il est possible de retremper ces volumes pour obtenir quelque chose qui soit en une seule pièce.

N. Milion :

Avant de répondre à la question, Bernard Pictet, pouvez-vous nous dire ce qu'est le verre sécurit ?

B. Pictet :

On a parlé de la résistance des verres aux chocs thermiques, et l'on a évoqué la vitrocéramique, matériau de pointe coûteux, et le borosilicate qui sert à faire des instruments de chimie qui résistent bien aussi aux chocs thermiques.

Mais il existe en effet des glaces qu'on voit partout, des glaces trempées : les glaces *sécurit* selon le terme de Saint-Gobain. C'est une glace normale qui a été chauffée à 500 ou 600 °C puis refroidie très rapidement, et qui, pour beaucoup de raisons, résiste à un choc thermique d'environ 200 °C. Ces glaces ne sont pas chères et sont en plus des glaces de sécurité, ce qui signifie que lorsque vous les cassez, elles ne sont pas vulnérantes car elles tombent en une pluie de petits éclats non coupants.

Maintenant, peut-on retremper quelque chose qui a été cassé en petits éclats et qui a été raboté ? Je ne le crois pas. En revanche, on peut le refondre. Vous ne pouvez le retremper, d'abord parce que, si vous avez mis de la colle, la colle va brûler à moins de 100 °C alors que la trempe s'obtient à 500 ou 600 °C.

Le but du jeu serait justement de se débarrasser de la colle.

B. Pictet :

Ensuite, l'idée même de la trempe est d'avoir un refroidissement rapide. Or, plus vous avez d'épaisseur, moins vous avez un refroidissement rapide. Donc cela me semble très difficile.

En revanche, vous pouvez très bien faire fondre les éclats de façon à recréer une pièce entière. Les vitraux de Soulage à Conques, par exemple, sont issus de ce concept. L'idée était de prendre des bouts de verre plus ou moins gros, de les mettre dans des moules et de chauffer plus ou moins. Plus vous chauffez, plus le verre devient transparent ; moins vous chauffez, plus il y a de films, de bulles, etc. En variant sur la grosseur des éclats et sur la montée en température, on peut obtenir tous les degrés d'opalescence. C'est ce genre d'effet que vous pouvez obtenir.

J.-P. Houdaer :

Si vous chauffez suffisamment jusqu'à l'obtention réelle d'une fusion et homogénéisation de votre verre (élimination des bulles gazeuses par un «affinage»), vous pouvez alors, après mise en forme et si celle-ci le permet, tremper l'article fabriqué. Tout le verre recyclé est ainsi refondu et réutilisé (après en avoir enlevé les impuretés qui ne sont pas du verre).

H. Arribart :

Si j'ai bien compris, c'est du massif. La trempe d'un objet massif est quelque chose de très complexe.

Je vais perdre l'effet cassé du verre sécurit, ce qui m'intéresse moins.

J.-P. Houdaer :

Tout à fait, si vous refondez, vous perdrez l'effet. Pour ne pas perdre cet effet, il ne faut pas chauffer très fortement, 900 à 1 100 °C maximum, et dans ce cas, avec du verre plat, vous faites ce qu'on appelle du «*fusing*», technique très à la mode actuellement chez les créateurs.

H. Arribart :

Je comprends un peu mieux votre question. En fait, ce n'est pas la trempe qui vous intéresse, mais le côté éclaté. Dans ce cas, il faut faire une sorte de frittage, c'est-à-dire tout remettre dans un four et coller à chaud en vérifiant bien votre degré de cuisson de façon à ce que le verre soit suffisamment fondu pour que les morceaux adhèrent entre eux, mais pas suffisamment pour devenir monolithiques.

J.-P. Houdaer :

En revanche, vous ne pourrez pas tremper dans ce cas.

Je n'ai pas de four chez moi. Existe-t-il des colles très performantes ? Actuellement, j'utilise de la glu et ce n'est pas très satisfaisant.

H. Arribart :

Les colles destinées à ce type d'usage sont des colles aux ultraviolets. Il s'agit d'une colle transparente qui fait penser à de l'eau - il existe différentes viscosités, mais certaines sont assez proches de l'eau -, qui réticule uniquement quand on projette dessus des ultraviolets, le verre étant perméable aux ultraviolets. C'est une colle extrêmement puissante puisque le cisaillement est de l'ordre de 100 kg/cm². C'est donc une colle invisible, qui marche très bien avec le verre, et qui est puissante. Pour ce que je comprends de ce que vous voulez faire, c'est la colle que je vous conseille.

N. Milion :

M. Pictet, ce type de question est un peu votre quotidien puisque, chez vous, les créateurs et les architectes viennent avec une idée, à partir de laquelle vous discutez de la possibilité de réalisation ou non, vous faites évoluer le projet...

Je voudrais revenir sur votre parcours qui est exceptionnel. Vous aviez commencé des études de droit, et vous avez rencontré un monsieur qui travaillait dans le domaine du verre. Il prenait sa retraite, et vous avez repris son atelier avec un ami. Vous êtes un total autodidacte dans le verre puisque vous n'avez pas suivi de formation et que vous n'appartenez pas à une lignée de verriers. Aujourd'hui, vous travaillez avec les plus grands dans le domaine de l'architecture - vous avez travaillé notamment avec Jean Nouvel -, de la décoration...

Parlez-nous de votre travail.

B. Pictet :

J'ai travaillé avec les équipes de Jean Nouvel, mais pas avec lui directement.

Cela fait maintenant 28 ans que je suis dans ce métier. Lorsque j'ai débuté, je n'y connaissais en effet pas grand chose et c'est peut-être ce qui m'a sauvé parce que, n'y connaissant pas grand chose, j'ai fait des choses que les gens qui savent n'auraient peut-être pas eu l'idée de faire. Ma démarche était très simple : je me suis dit que le verre avait beaucoup de possibilités, mais qu'il était employé par les créateurs avec beaucoup de respect mêlé de crainte, et qu'il n'était pas du tout employé comme les autres matériaux, métal ou bois. J'ai tout simplement détourné des techniques du bois et du métal, ce qui a donné de nouvelles fonctions au verre.

Tout cela est venu petit à petit, et, dans le même temps, d'autres gens s'intéressaient aussi à la résistance du verre et aux applications qu'on pouvait en faire dans le bâtiment. Je m'y suis mêlé et ma démarche a été de donner n'importe quelle fonction, n'importe quelle apparence au verre, avec notamment les garde-corps en verre. Nous ne sommes pas les premiers à l'avoir fait - les premiers garde-corps en verre ont été, je crois, ceux du Grand Louvre - mais nous les avons perfectionnés en faisant une main courante en verre massif.

J'ai une question sur le bâtiment : on voit des immeubles de bureaux en verre avec de très importantes surfaces en verre, mais peut-on construire une maison individuelle tout en verre ? Le verre étant un matériau qui a une faiblesse au plan de l'isolation thermique, comment peut-on compenser ce défaut ?

H. Arribart :

Historiquement, il y a eu plusieurs étapes qui ont conduit aujourd'hui à des vitrages qu'on appelle «d'isolation thermique renforcée», le plus connu étant le double vitrage.

Les phénomènes qu'on cherche à combattre sont tout ceux qui transmettent la chaleur, c'est-à-dire la conduction (la chaleur qui passe à travers l'objet même), la convection sur les mouvements d'air qui se produisent dans une pièce et qui servent à chauffer en même temps que parfois à refroidir, enfin, le rayonnement. Le rayonnement infrarouge est invisible, mais contribue beaucoup au transfert d'énergie et donc aux échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur d'une maison.

La première étape a consisté à combattre la convection qui a lieu de part et d'autre d'une feuille de verre unique, en emprisonnant une lame d'air en sandwich entre deux feuilles de verre. De cette façon, on confine cette convection et l'on réduit de beaucoup les pertes de chaleur. Pour sophistication un peu les choses, on a remplacé l'air par des gaz qui ont des propriétés thermiques plus intéressantes comme le xénon par exemple. La première étape a donc été les doubles vitrages.

Ensuite, on a voulu combattre les transferts de rayonnement. Une propriété du verre à laquelle on ne pense pas souvent est que, d'une certaine façon, il est trop transparent. On l'apprécie parce qu'on voit au travers, mais cela revient à ne considérer que la gamme du visible du spectre électromagnétique. Or il y a également l'ultraviolet, l'infrarouge, etc. Le verre transmet l'ultraviolet et l'infrarouge ; en particulier, il laisse passer relativement facilement l'infrarouge thermique, c'est-à-dire le rayonnement qui s'échappe d'une maison quand il fait chaud à l'intérieur et froid à l'extérieur. Les verriers ont appris, pour pallier ces déperditions de chaleur, à associer au verre d'autres matériaux, sous forme de couches très minces de façon qu'on continue à voir au travers, mais qui néanmoins réfléchissent vers l'intérieur de la pièce ce rayonnement infrarouge. Aujourd'hui, le plus courant est de déposer sur le verre une couche de 10 nm d'épaisseur d'argent métallique. On continue à voir au travers mais le rayonnement infrarouge est réfléchi vers l'intérieur.

N. Milion :

Le verre peut-il intervenir de façon mécanique dans la structure d'une maison, par exemple, en participant à la structure porteuse ?

H. Arribart :

Oui, on peut effectivement concevoir et réaliser ce qu'on appelle du verre structurel, c'est-à-dire des poutrelles. Il n'en existe pas beaucoup d'exemples car cela revient assez cher, mais je citerai la verrière de l'hôtel Georges V à Paris, qui est complètement faite de verre.

B. Pictet :

Je suis à la fois d'accord et pas d'accord. Il est vrai qu'on a des poutrelles en verre, mais ce ne sont jamais des structures primaires. Ce sont toujours des structures secondaires, qui ne doivent supporter que la peau de verre elle-même. En aucun cas, elles ne peuvent être structurelles du bâtiment.

N. Milion :

Cela pourra-t-il techniquement s'améliorer ou avons-nous atteint les limites des possibilités du verre ?

J.-P. Houdaer :

Je ne suis pas tout à fait d'accord avec M. Pictet. La revue *Verre*, de l'Institut du verre, a publié un numéro spécial dans lequel elle donne beaucoup d'exemples de verres vraiment structurels.

Je voudrais rebondir sur une partie de votre question et aborder le problème des vitrages pour le bâtiment.

Les verriers parlent de coefficient U (qui exprime la perte de chaleur au travers d'un matériau). Avec un simple vitrage, le coefficient U est de 5,7 ; avec un double vitrage 4/12/4 classique, le coefficient est de 2,9 ; avec les vitrages à basse émissivité, il est à moins de 1,5. Nous avons fait une enquête en 2002, pour toute l'Europe - à l'époque Europe des quinze -, et celle-ci possédait 46 % du parc de fenêtres en double vitrage, très souvent classique. Si nous pouvions passer l'ensemble du parc de fenêtres en vitrages à basse émissivité, cela permettrait une économie d'énergie de 14 millions d'euro par an, et se traduirait par une réduction de 82 millions de tonnes par an des émissions de CO₂ dues à l'habitation. Ce serait une bonne chose pour le développement durable, et c'est un message que nous avons essayé à plusieurs reprises de faire passer auprès du Gouvernement...

N. Milion :

Y a-t-il un émissaire du Gouvernement dans la salle ? Non. Qui souhaite poser une question ?

L'expertise des verriers englobe-t-elle les panneaux solaires ou les panneaux photovoltaïques, dont les rendements me paraissent un peu faibles. Dans l'affirmative, a-t-on une idée de l'amélioration qu'on peut apporter ? Cela reste toujours dans le débat sur l'énergie.

H. Arribart :

Effectivement, les verriers s'en préoccupent et fabriquent des modules photovoltaïques. Comme vous le

savez, ce n'est pas le verre lui-même qui transforme la lumière en électricité, mais il faut bien que la face tournée vers le soleil soit transparente, et le seul matériau transparent qui soit capable de résister aux intempéries pendant 10 ans ou davantage, c'est le verre.

Il faut voir la contribution des verriers dans ce domaine en deux temps.

D'abord il s'agit d'encapsuler des dispositifs fabriqués par d'autres industriels, c'est-à-dire prendre en sandwich une cellule photovoltaïque entre deux feuilles de verre, d'habiller le tout et de prendre des connexions. Je passe très vite sur des problèmes technologiques qui ne sont pas nécessairement faciles à résoudre. Tout cela se fait couramment, et aujourd'hui, la plupart des cellules photovoltaïques sont effectivement encapsulées dans du verre.

Les prochaines générations de panneaux photovoltaïques, qui commencent à apparaître, seront à base de couches minces. Cette fois, on n'a plus affaire à une petite galette de silicium de 0,5 mm d'épaisseur, mais à quelque chose de beaucoup plus fin, qui n'aurait pas de capacité à se supporter soi-même. Il s'agit de semi-conducteurs qu'on dépose sur le verre lui-même sous forme de couches minces. Ensuite, on prend les contacts. On peut rencontrer à nouveau des problèmes techniques purement verriers pour arriver à refléter le minimum de lumière possible, de façon à augmenter le rendement de la cellule photovoltaïque. Le verre ne reflète pas beaucoup la lumière, mais il y a quand même 4 % de lumière qui est réfléchi à chaque interface entre l'air et le verre. Si l'on supprime cette réflexion, c'est autant de gagné.

Nous développons donc actuellement des systèmes soit à base de couches minces, soit à base de texturation de la surface qui minimise cette part de lumière réfléchi.

Vous restez donc au silicium amorphe.

H. Arribart :

Pas nécessairement. Depuis le silicium amorphe, de nouveaux matériaux sont apparus, dont le chalcogénure d'indium et de sélénium, semi-conducteur de composition et de structure plus compliquées que le silicium, mais qui a de meilleures performances sous forme de couche mince.

Le film a présenté l'une des applications remarquables du verre : les fibres optiques.

Tant qu'il s'agit de transformer les électrons en photons pour les véhiculer d'une façon linéaire, cela ne pose pas énormément de problèmes, mais cela dépend du type de fibre et vous pourriez déjà nous décrire la différence entre les types de fibres existants.

Par ailleurs, il est très délicat de résoudre les problèmes de dérivations. Si l'on veut faire, par exemple, des bus, et des insertions pour faire des dérivations, on a une perte d'insertion qui, très rapidement, oblige à remettre

des répéteurs pour pouvoir re-générer le signal photonique en électrons puis de nouveau en photonique.

Mes deux questions, pour résumer : d'une part, un aperçu sur les types de fibres optiques, qui ne servent pas simplement à transmettre de la lumière, mais aussi de l'information, et à très grande vitesse ; d'autre part, comment résoudre ces problèmes de pertes d'insertion pour éviter les problèmes de répéteurs qui sont assez compliqués parce qu'il faut aussi leur amener de l'énergie pour qu'ils puissent fonctionner ?

R. Vacher :

Une fibre optique est essentiellement fabriquée avec deux verres. On les fabrique généralement avec des préformes, c'est-à-dire des verres creux, qui ont des dimensions de l'ordre de quelques centimètres, et à l'intérieur desquels on dépose un autre verre de telle sorte que l'indices de réfraction des deux verres soit différent et que le phénomène de réflexion totale puisse se produire. Une fibre optique de télécommunication fait typiquement dans les 125 μ de diamètre une fois étirée et comporte un cœur qui est généralement de la silice avec un peu d'oxyde de germanium et un certain nombre d'autres choses.

Lorsqu'on veut une fibre monomode, la dimension est de l'ordre de 8 μ . Les fibres monomode sont les seules, à ma connaissance, qui soient utilisées pour les télécommunications à longue distance car le problème est de confiner la lumière pendant de longues distances et de garder le système cohérent.

Dans une fibre multimode, la lumière, au lieu de se propager uniquement dans l'axe de la fibre, se propage aussi selon d'autres modes, ce qui a l'inconvénient majeur que les différents modes ne se propagent pas à la même vitesse. Par conséquent, si vous modulez le signal à l'entrée, vous obtenez un signal qui est complètement perdu à la sortie.

En télécommunication standard, à ma connaissance, on utilise donc essentiellement des fibres monomode. Cela étant, à l'heure actuelle, on a des pertes de l'ordre de 0,15 décibels par kilomètre dans les fibres de silice, ce qui permet en gros d'avoir un répéteur tous les 50 ou 100 km.

J'ai tendance à dire qu'à ce stade, étant donné qu'on peut faire des fibres de longueur considérable, le problème de la transmission à longue distance est, de ce point de vue, pratiquement résolu. Il faut des répéteurs tous les 50 km, mais il faut essentiellement des répéteurs à cause de la perte du verre. L'un des problèmes auxquels s'attaquent les laboratoires, et le nôtre en particulier, est de trouver comment obtenir des verres qui aient à la fois les propriétés mécaniques et la durabilité dont on a besoin. On peut fabriquer des verres exotiques, par exemple des fluorures, qui ont des propriétés très intéressantes, mais qui, a priori, ne peuvent être utilisés dans les télécommunications de grandes distances parce qu'ils n'ont pas les propriétés dont on a besoin. Quand on immerge une fibre au fond de l'océan, il faut qu'elle y reste et qu'elle soit stable.

A l'heure actuelle, le problème qui se pose est un problème d'amélioration de la qualité du verre pour avoir moins de répéteurs. Mais dans ce type de télécommunication, on n'a pas besoin d'interrompre le signal ; on l'interroge chaque fois qu'on veut le regonfler. L'un des problèmes qu'il faut parvenir à résoudre dans tous ces systèmes est le problème de l'amplification large. Quand on veut passer beaucoup de signaux, il faut, comme en radio standard, passer des signaux de fréquences différentes, ce qui veut dire, pour simplifier, qu'on envoie des lumières de couleurs différentes. Ce sont des différences de couleurs extrêmement faibles, mais on envoie plusieurs faisceaux (typiquement 64), et il faut pouvoir envoyer tous ces faisceaux de couleurs différentes à l'intérieur de la fibre et les sortir. Le problème actuel pour la télécommunication longue distance est donc de fabriquer des composants pour faire du multiplexage et du démultiplexage.

Maintenant, en télécommunications, le problème qui va devenir crucial est celui des réseaux accès et métro. Il s'agit de passer du stade, actuellement généralisé, du transport de communication entre les villes, au stade où la communication à l'intérieur des villes et la distribution jusqu'au poste de l'abonné se feront en fibres optiques. Cela pose le problème que vous soulevez, c'est-à-dire la multiplicité des interfaces qu'on est obligé d'avoir. Les questions qu'on se pose actuellement sont essentiellement celles de la fabrication d'amplificateurs à bas coût et à grande largeur. On pense par exemple aux amplificateurs à effet Raman, qui permettent d'amplifier un signal par des effets d'optique non linéaires à l'intérieur de la fibre, en mettant des dopants comme de l'argent. Le problème des interfaces se posera toujours et c'est aussi un problème technologique de mise en œuvre. Il faut que la mise en œuvre soit simple et qu'elle puisse être faite par un non spécialiste. Il ne faut donc pas que ce soit au niveau du soudage que le problème soit difficile. A la limite, on préfère garder des soudages dont la qualité ne soit pas excellente, et fabriquer des amplificateurs qui aient des effets forts, de façon à ne pas avoir besoin, comme vous le disiez, de remettre trop d'énergie à l'intérieur du système.

Le verre, en tant que matériau, peut-il faire un retour dans le verre ophtalmique, le verre de lunettes ?

J.-P. Houdaer :

Selon les pays, il existe de grandes différences. Aux Etats-Unis et dans certains pays, on ne jure que par le plastique et par sa légèreté. Dans certains pays européens, comme l'Allemagne, les pays du Nord ou même la France, la plupart des gens tiennent encore au matériau verre, à son aspect et à sa résistance à la rayure notamment. Il y a donc réellement deux écoles actuellement. Quand on écoute Essilor, il est vrai que la tentation de passer au plastique est grande. On fait de moins en

moins de verres ophtalmiques en verre minéral, mais il y a encore une grande résistance dans certains pays.

N. Milion :

Donc, quand on dit *verres de lunettes*, ce n'est plus du verre ?

J.-P. Houdaer :

Il existe beaucoup de verres plastique, sur lesquels nous mettons un traitement qui est un verre à base sol-gel, donc un verre réalisé à froid et qui permet de durcir notamment les matières organiques. Bientôt, ces sol-gel contiendront des éléments photochromes, ce qui permettra d'obtenir ainsi des lunettes photochromiques à plus bas prix qu'actuellement.

Ma question prolonge la question sur le cristal - celui des verriers et non celui des physiciens. La vaisselle ancienne est émaillée ; l'émail est quelque chose comme un verre qu'on veut fusible et il contient des sels de plomb. Pour cette raison, on déconseille fortement aux gens qui ont de la vaisselle ancienne de l'utiliser parce que le plomb peut sortir de l'émail et provoquer du saturnisme.

Qu'en est-il du cristal des verriers, qui contient du plomb ? Peut-on boire dans un verre en cristal ?

J.-P. Houdaer :

Il y aura peut-être plusieurs réponses.

Actuellement, les services en cristal se vendent toujours, même si l'on en vend moins.

Vous ne vous empoisonnez pas en buvant dans un verre en cristal car vous ne laissez pas le liquide dans le verre pendant trois semaines, un mois ou six mois, mais vous allez le boire en quelques minutes ou en quelques heures au maximum. Le plomb n'a donc pas le temps de migrer dans le liquide. De plus, il faut rappeler que le plomb est bien intégré dans la structure, que, de plus, il a une taille importante, aussi ce sont les éléments de petites tailles présents en surface (le sodium par exemple) qui sont les premiers à migrer lorsque les conditions sont favorables.

Le véritable problème était celui des carafes contenant, par exemple, du très bon cognac. Les verriers ont trouvé une parade en déposant un revêtement à l'intérieur des carafes, en silice pure par exemple, de telle sorte qu'il n'existe plus aucun contact entre le liquide et le plomb du cristal.

J'ai assisté à la projection de l'excellent documentaire d'Annie Chevallay, qui nous fait passer d'artistes qui s'expriment à travers le verre comme matériau, d'artisans verriers souffleurs, dans l'Antiquité ou à Murano, à des ingénieurs qui font du verre superhydrophobe ou de la fibre optique. C'est le talent de la réalisatrice qui fait qu'on vogue de façon toute naturelle entre ces diffé-

rents mondes, mais qui apparaissent tout de même très éloignés les uns des autres.

J'ai eu entre les mains des numéros du magazine Verre, qui est le magazine professionnel du secteur, dans lequel il y a à la fois des articles très techniques sur l'abrasion des surfaces, les fours, etc., et des articles qui sont des critiques artistiques.

Ma question s'adresse plus particulièrement à M. Arribart. Je classe Saint-Gobain dans les très grandes multinationales, proches de Microsoft ou de l'Aérospatiale, mais j'ai le sentiment que Saint-Gobain est sur une toute autre planète que les artistes ou les artisans verriers, qui vivent plutôt dans le monde des bronziers, des céramistes d'art. J'aimerais savoir comment, de votre position, vous percevez cet autre univers et quelles relations vous pouvez avoir avec lui ?

H. Arribart :

Vous avez en partie raison. Il est certain que produire dans des usines 700 tonnes de verre par jour pour faire du vitrage est une activité avec des conditions limites, des contraintes qui sont différentes de celles de l'artisan ou de l'artiste verrier. Ce n'est pas le même métier.

Néanmoins, le matériau est bien le même et nous l'utilisons, à la base, de la même façon, ce qui n'est peut-être pas le cas pour les autres matériaux. Il existe des spécificités que René Vacher a rappelées, qui tiennent à la structure même du verre et qui font qu'un artisan verrier et un industriel verrier ont plus de choses à se dire qu'un maréchal-ferrant et un grand industriel de la fonte. Nos problèmes communs découlent directement des propriétés du verre. Il peut s'agir de problèmes d'aspect du matériau, car, même si l'industriel ne fait pas un objet d'art, très souvent il essaie de proposer des produits et des matériaux qui soient beaux - il faut savoir que le verre pour la décoration intérieure et pour l'ameublement représente, en chiffre d'affaires, environ 25 % des applications du verre dans le bâtiment. Les problèmes de couleur, de finition de surface, de dépoli, les problèmes de découpe, de formes complexes, sont également partagés par les artisans et les industriels. Par l'intermédiaire d'organismes professionnels, de l'Institut de verre, de la revue *Verre*, s'instaure un dialogue, qui n'est pas quotidien mais qui existe bel et bien.

N. Milion :

Demandons son avis à Bernard Pictet, un verrier. Vous sentez-vous sur la même planète que les verriers de Saint-Gobain ?

B. Pictet :

Oui et non. Oui dans la mesure où nous utilisons leurs produits et qu'il y a parfois des nouveautés intéressantes ; oui aussi dans la mesure où le prix du verre au kilo a beaucoup baissé en vingt ou trente ans, ce qui permet de faire plus de choses. Non, dans la mesure où malheureusement aussi, en vingt ou trente ans, du fait de la recherche de compétitivité des verriers, ils se livrent entre eux des batailles

pour acquérir des marchés, ce qui les oblige à serrer leurs prix et à s'occuper moins du superflu et plus de l'essentiel. Il y a ainsi des pans entiers de l'industrie qui, auparavant, servaient à la décoration et qui, maintenant, sont des friches industrielles. Je pense à cet atelier qui permettait de faire 250 couleurs dans des nuances merveilleuses il y a trente ans. C'était un outil unique au monde, qui n'existe plus pour des raisons uniquement financières.

N. Milion :

M. Houdaer, tous les verriers se côtoient au sein de l'Institut du verre ?

J.-P. Houdaer :

Oui, c'est le seul endroit, je crois, où tous les verriers se retrouvent.

Pour répondre à la question, en complément des propos d'Hervé Arribart, vous avez vu dans le film que Jean-Michel Othoniel est allé travailler à Saint-Gobain Recherche pour résoudre certains problèmes qu'il rencontrait. Il existe donc bien des liaisons entre les artistes et les industriels.

Une autre remarque concerne les fameuses teintes rouge rubis au cuivre ou à l'or. Ce sont des artistes qui les ont développées au départ, et les industriels les ont ensuite étudiées et en ont vu le grand intérêt. Avec le développement des nanosciences, on s'aperçoit qu'avec ce rouge rubis, on produisait déjà des agrégats de l'ordre du nanomètre, c'est-à-dire que les artistes avaient plusieurs milliers d'années d'avance par rapport à ce qu'on va faire maintenant dans ce domaine.

N. Milion :

Je voudrais souligner la phrase de M. Othoniel, qui dit dans le film : «Travailler le verre quand on n'est pas verrier, c'est désirer l'inaccessible.»

Quel traitement faites-vous subir au verre pour qu'il soit antireflet ? Je suppose que les sous-verres comme les protections de tableaux ne subissent pas le même traitement que les verres de lunettes.

Pouvez-vous nous dire un mot de ce qu'on a vu dans le film, à savoir ces verres qu'on rend opaques ou transparents en actionnant un interrupteur électrique ?

Enfin, un des problèmes du verre est qu'il casse. N'est-il pas possible d'envisager un verre qui ne soit pas plus cassant que du bois ou de la tôle, c'est-à-dire dont la souplesse se rapprocherait de celle des fibres optiques ? Pour une épaisseur normale, une plaque de verre ne pourrait-elle pas encaisser des chocs comme une plaque de contre-plaqué ? Est-ce du domaine de l'utopie ou cela pourrait-il être réalisé un jour ?

H. Arribart :

Vous avez fait le tour d'une partie de notre programme de recherche.

S'agissant des verres antireflet, vous avez raison, il y a plusieurs façons de fabriquer un verre antireflet ou de procéder à un traitement antireflet du verre. Certaines sont plus onéreuses que d'autres ; certaines sont plus efficaces que d'autres. Dans ce domaine, ce qui se fait de plus sophistiqué se trouve probablement dans l'optique des appareils photos et des caméras. Mais ce que nous commençons à faire dans le domaine architectural, par exemple les vitrines de magasins de luxe, ou dans l'automobile, pour éviter les reflets très désagréables à l'intérieur de la voiture quand on a posé un papier blanc sur le tableau de bord, commence à s'en rapprocher.

Pour ces applications, on rejoint aujourd'hui les technologies les plus évoluées de l'optique, et c'est à nouveau par des couches minces déposées à la surface du verre. Ces couches minces correspondent toujours à l'idée de déposer d'autres matériaux en surface. Autrement dit, le verre n'a pas suffisamment de propriétés intéressantes, ou n'a pas les propriétés performantes que nous recherchons. Nous l'utilisons donc tel qu'il est, mais en ajoutant en surface des couches minces en multicouche d'un autre matériau. L'antireflet permet de diminuer le coefficient de réflexion, normalement égal à 4 %, jusqu'à 0,5 %.

Aujourd'hui, le cœur technologique du métier de verrier - du moins pour le verre plat, celui dont on fait les vitrages -, n'est plus le verre lui-même mais les couches minces. C'est là que se joue la concurrence, là que de nouvelles propriétés sont apportées au verre, et là que s'est opérée une véritable révolution technologique en l'espace de 20 ans.

A côté de ces dépôts multicouche, il existe des façons plus traditionnelles et moins onéreuses, qui consistent à dépolir la surface. Les reflets sont ainsi moins gênants parce que la surface diffuse un peu la lumière plutôt qu'elle ne la réfléchit de façon spéculaire comme un miroir.

Pour ce qui est du verre à propriétés optiques variables, il fait appel, à nouveau, à des couches minces déposées à la surface. Autrement dit, ce verre qu'on qualifie d'électrochrome, ou parfois de «verre intelligent» lorsqu'on n'a pas peur des mots, est un verre tout ce qu'il y a d'ordinaire. L'intelligence est d'avoir eu l'idée de déposer à la surface un dispositif capable de changer d'état optique, d'apparence, en appuyant sur un bouton. Ce dispositif n'est rien d'autre qu'une batterie électrochimique, comme une batterie d'automobile à cela près qu'elle est complètement solide. C'est une batterie transparente, déposée sous forme de couches minces, successivement : une amenée de courant électrique (l'équivalent du fil électrique + de la batterie), par dessus une électrode, puis un électrolyte (l'équivalent de l'acide liquide), la deuxième électrode, et enfin la deuxième amenée de courant. Tout cela est déposé sous forme de couches faites de matériaux différents, qui ont chacune des épaisseurs de l'ordre de 100 nm. En plus d'être à l'état solide, en couches minces, transparentes, cette batterie a la propriété que l'une des électrodes change de couleur, de propriétés optiques, quand les ions sont insé-

rés à l'intérieur. Une fois qu'on a su identifier les bons matériaux, qu'on a su les déposer dans le bon ordre et prendre les connexions extérieures, on a su faire ces vitrages à propriétés optiques variables.

L'électrochrome est déjà une belle prouesse technologique. Nos programmes de recherche dans ce domaine ont commencé en 1984, et nous livrerons les premiers exemplaires industriels l'année prochaine, après 21 ans d'efforts de recherche et développement, ce qui indique combien la tâche était difficile.

Est-ce plus utopique de penser à un verre qui résisterait à l'impact d'une balle de mitrailleuse que de penser à un verre qui change de couleur quand on appuie sur un bouton ? Non, car cela existe depuis plus longtemps. Des verres de blindage sont produits de façon industrielle. Ce ne sont pas des marchés considérables, mais, par les temps qui courent, ils sont malheureusement en forte croissance.

D'une façon qui peut paraître paradoxale, pour obtenir cet effet, il faut associer cette fois le verre à un matériau mou, parce que ceux-ci absorbent l'énergie cinétique. Nous réalisons donc des multi-sandwich, qui, en alternance, sont constitués de feuilles de verre minéral et de polymères transparents. Le verre apporte la structure, la rigidité, et les polymères apportent l'absorption d'énergie.

Evidemment, une fois qu'un tel vitrage a été soumis à une rafale de mitrailleuse, il est endommagé et il faut le remplacer, mais, au moins, les balles ne l'ont pas traversé.

Je voudrais revenir sur les rapports de l'art avec l'industrie. J'ai eu une expérience étonnante avec Saint-Gobain Recherche en tant qu'artiste. J'ai été reçue pour fabriquer une sculpture en verre à vitres de 3 m de haut, et, après huit mois d'allées et venues entre Thourotte et mon domicile, Saint-Gobain m'a annoncé qu'il ne pouvait pas faire réaliser cette pièce, ce qui m'a paru aberrant car, pour moi, Saint-Gobain était le seul endroit capable de le faire. J'ai fini par le faire réaliser par une petite usine. Bernard Pictet m'a beaucoup aidée et je l'en remercie. Je suis étonnée par cette différence entre l'échelle de Saint-Gobain, ses moyens énormes et son côté « empire », et sa réponse à une demande qui n'était pas irréalisable puisqu'on a fini par la mettre en œuvre dans une petite miroiterie en Bretagne.

Je me pose donc la question de ce qu'un artiste doit faire lorsqu'il a une demande spécifique, avec certaines contraintes ? Où peut-il s'adresser ?

H. Arribart :

Je pense que vous pouvez toujours venir chez nous pour des conseils, éventuellement pour la réalisation. Mais dans certains cas, il faut faire appel à des procédés qui ont existé dans le passé, qui ne sont plus des procédés économiquement viables et que nous n'avons donc pas gardés, mais qui, heureusement, sont conservés chez des artisans.

Il y a quelques mois, une artiste comme vous est venue me voir pour une sculpture de 3 m de haut, qu'elle souhaitait animer, rendre vivante. Nous avons beaucoup réfléchi à partir d'électrochromes, à partir de verres qui émettent de la lumière, à partir d'effets photochromes, thermochromes, tout ce qui peut être lié d'une façon ou d'une autre à un changement d'apparence. Tout cela pour arriver à quelque chose qui semblait crédible et réalisable. Nous avons eu des idées utopiques, dont certaines sont restées au rang d'utopie et dont d'autres ont pu être concrétisées. Mais au moment de la réalisation, nous nous sommes trouvés dans la même situation que la vôtre, ce qui m'a permis d'ailleurs de faire la connaissance d'artisans verriers à Paris, qui gardent le savoir-faire et la maîtrise du bombage, de la courbure de verre artisanal, etc. Je crois vraiment qu'il faut le voir comme une complémentarité. Mais, pour des conseils, pour savoir si c'est faisable ou non, et indépendamment du fait que cela se fasse chez nous ou ailleurs, nous sommes toujours disponibles.

Je suis professeur de décoration sur verre. Je voudrais rester dans le domaine de l'utopie pour traiter d'un défaut du verre qui intéresse beaucoup mes élèves ainsi que beaucoup de professionnels, à savoir la fragilité en surface, c'est-à-dire la rayure du verre. Peut-on envisager un jour des verres avec une sorte de peau qui se refermerait sur les rayures afin d'éviter ce défaut qui est un réel problème pour tous les professionnels du verre ?

H. Arribart :

On peut l'envisager, et on y travaille, mais la question sera de savoir si l'on appellera encore cela du verre. A mon avis, mais je peux me tromper dans mes pronostics, la meilleure chance qu'on aura de le réussir sera d'associer intimement, à l'échelle moléculaire, l'organique et l'inorganique, donc les polymères et le verre minéral. C'est ce qu'on appelle les matériaux hybrides et l'on peut espérer que dans un délai de quelques années, on soit capable de trouver des revêtements formulés selon ce principe d'association, de façon extrêmement intime, de dur et de mou pour obtenir le phénomène que vous mentionnez.

Vous nous disiez tout à l'heure que le verre avait une structure atomique désordonnée. Cela a-t-il des effets sur la continuité du matériau, pour conserver des qualités sur toute une plaque de verre ? De façon générale, quelles conséquences cette désorganisation de la structure atomique a-t-elle ?

R. Vacher :

Si je comprends bien votre question, vous vous demandez si le verre est un matériau homogène. La réponse est oui. Ce que je vous ai montré est à l'échelle atomique. Lorsque vous regardez un verre standard avec un micros-

cope électronique, vous ne voyez absolument rien. Lorsque vous regardez avec un microscope à force atomique, vous voyez des irrégularités sur la surface, mais il est fort probable qu'au-delà de 5 nm, le verre est un matériau homogène. Cela signifie que, si vous étiez capable de couper des morceaux de 10 nm de côtés et de les peser, vous trouveriez exactement la même densité partout. Donc dans le cœur du matériau, le verre est homogène. Il ne devient hétérogène et désordonné qu'à des échelles inférieures, autour du nanomètre et en-dessous.

Pour revenir à une question moins technique et plus festive, le verre sert à faire des choses merveilleuses et, en particulier, les vitraux des cathédrales. Est-il exact qu'on est incapable de refaire les coloris qu'on trouve dans les vitraux du XII^e ou du XIII^e siècle, surtout les rouges et les bleus. Par exemple, les vitraux modernes de Chagall dans la cathédrale de Reims ont des couleurs assez pâles. A l'inverse, dans l'église de Baccarat, où les vitraux sont en cristal de Baccarat, on retrouve des couleurs assez chaudes qui rejoignent un peu les vitraux dont je parlais. Nous autres «grands ethnologues» avec nos laboratoires de recherche extraordinaires sommes-nous donc vraiment incapables de reconstituer la matière qui a fait ces vitraux merveilleux qu'on voit dans toutes nos cathédrales en France ?

J.-P. Houdaer :

Vous avez vu dans le film que l'usine de Saint-Just de Saint-Gobain possède une palette de plusieurs centaines de couleurs, à mon avis, très proches de la plupart des vitraux. La majorité de ses fabrications sont destinées à réparer des vitraux - nous possédons, en France, plus de la moitié des vitraux qui existent au monde.

Les couleurs sont plus chaudes avec du cristal simplement en raison de la présence du potassium à l'intérieur du cristal. Quand on fabrique du cristal, on n'utilise pas de natron (carbonate de sodium), mais du potassium, qui donne des couleurs beaucoup plus chaudes. Et l'on sait, là aussi, réparer, refaire. Qui plus est, les maîtres verriers, les «vitraillistes», qui ont du métier, se chargent d'améliorer les choses quand elles ne sont pas tout à fait conformes, à l'aide de techniques de décoration parfaitement maîtrisées.

N. Milion :

J'aimerais revenir sur un mot entendu dans le film présenté plus tôt : «Aujourd'hui, les gens sont fascinés par le verre, mais ne sont pas prêts à y mettre le prix.» M. Pictet, pouvez-vous nous donner une idée de ce que peut coûter un objet ou une structure en verre ?

B. Pictet :

D'une part, nous ne faisons pas d'objets ; d'autre part, nous sommes exclusivement spécialisés dans le luxe, et

c'est effectivement très cher. Nos premiers traitements de surface commencent à 100 €/m² pour un dégradé de dépoli - complètement dépoli et opalescent en bas et devenant de plus en plus transparent en remontant -, et peuvent aller jusqu'à 7 000 €/m² selon la difficulté.

N. Milion :

Vous avez d'ailleurs une liste de clients impressionnante, qui figure sur votre site. Vous avez travaillé pour les plus grands, des stars du showbiz aux politiques.

J.-P. Houdaer :

A Murano, pour une belle pièce, un beau vase par exemple, il faut compter entre 4 500 et 6 000 €.

A. Chevallay :

Je crois que le public ne se rend pas très bien compte de ce qu'est le verre soufflé «*fatto a mano ea soffio*» et le verre normal moulé. C'est la notion de l'unicité, c'est-à-dire qu'un verre soufflé est unique. On entre dans une autre vision avec le soufflé, qui est comme une parole de l'artiste que vous auriez sur votre table. Les structures en verre sont absolument magnifiques et là, il faut y mettre le prix. Une fascination, je n'aime pas dire un engouement, pour le verre est en train de jaillir actuellement, et je sens, dans toutes les expositions quelles qu'elles soient, une réactivité dans le regard et dans l'approche du verre. Peut-être faudra-t-il éduquer pour donner aux gens l'envie d'avoir un verre soufflé en cristal pour y mettre un très bon vin.

Pourriez-vous nous dire quelques mots sur le recyclage du verre et sur sa toxicité au plan environnemental ?

Quel est l'avenir du verre dans le domaine alimentaire par rapport à tous les dérivés plastiques ?

J.-P. Houdaer :

S'agissant du recyclage du verre fabriqué en France, les dernières statistiques donnent 63 % du verre ménager récupérable qui est effectivement récupéré. Il faut savoir que nous vendons des bouteilles pleines à l'étranger, que nous ne pouvons récupérer. Si vous enlevez également le verre de la filière cafés/hôtels/restaurants, où il sert plusieurs fois, il reste un certain tonnage de verre, dont à peu près 63 % est recyclé. Nous sommes très proches des objectifs européens.

Néanmoins, le verre, pour être recyclé, doit être traité. Il existe de petites usines de traitement, utilisant des moyens techniques assez sophistiqués.

En revanche, la collecte peut poser problème. On arrive à recycler vraiment parfaitement tout le verre mis en container. Les difficultés surviennent pour le recyclage du verre des poubelles «verre» car lorsque les autres poubelles sont pleines, on met dans cette poubelle «verre» n'importe quoi, et le tri est ensuite difficile. En France, le recyclage n'est pas toujours facile. Quelques villes ont

fait des mauvais choix : le verre ne faisant pas l'objet d'une collecte positive en container, son traitement est difficile et cher, et l'utilisation de ce calcin spécifique est difficile en bouteille.

On peut recycler le verre à 100 %, et éternellement. C'est l'intérêt de la présence de la molécule SiO_4 , qui forme la structure des verres classiques (silico-sodo-calciques). Dans cette molécule, les forces de liaisons sont très fortes, résistent aux nombreuses fusions et permettent donc un recyclage indéfini de ce verre. Ces verres de base, verres à vitres ou verres à bouteilles, représentent 95 % du verre élaboré au monde. Il existe toutefois une petite différence entre le verre à vitres et le verre à bouteilles : dans le verre à vitres, il y a 3 à 4 % de magnésie parce que le verre plat obéit à la garantie décennale du bâtiment - on doit absolument garantir que dix ans après, on y verra toujours aussi clair et que le verre ne sera pas abîmé en surface. En mettant un peu de magnésium, on améliore les choses. Avec les bouteilles, on n'a pas ce problème et l'on n'est donc pas obligé d'ajouter de la magnésie.

S'agissant de la toxicité du verre au plan environnemental, rassurez-vous, les verres que vous utilisez pour tout ce qui est ménager - pots de confiture, bouteilles, flacons, etc. - sont absolument garantis non toxiques. J'ai signé un grand nombre de certificats, je suis toujours expert à la Cour d'appel de Paris, et je peux vous assurer que vous ne vous intoxiquerez pas en utilisant le verre comme matériau d'emballage.

S'agissant de l'avenir du verre par rapport aux dérivés du plastique, c'est l'éternelle bataille ! Les matières plastiques, de par leur légèreté, ont pris logiquement certains marchés. Le verre a des avantages et des inconvénients. Dans le cas de l'emballage, son inconvénient principal est le poids que doit transporter la ménagère. En revanche, il a des qualités formidables.

Le verre d'emballage reste toujours la référence lors des tests contenu/contenant, alors qu'avec d'autres matériaux, certaines matières plastiques par exemple, il se produit des échanges.

Un exemple frappant est celui d'une eau minérale gazeuse qui donne un aspect dégustation très différent après un stockage d'un ou deux mois en emballage plastique ou en verre. Les matériaux plastiques, pour concurrencer le verre, doivent utiliser des « multicouches » à effet barrière, mais alors les coûts d'emballages sont souvent plus élevés qu'avec le verre, et le recyclage devient très difficile (de plus, les résultats sur longue période, environ un an, ne sont pas toujours satisfaisants !).

On utilise souvent la fibre de verre dans des matrices polymères, en associant de fait les caractéristiques d'un verre qui est résistant à l'allongement et d'un polymère qui est relativement souple. A l'interface entre les deux

composants, il y a toujours un certain glissement ; certains additifs sont ajoutés. Ne serait-il pas possible de faire des verres à partir de fibres de verre et d'une matrice en verre en gardant un certain nombre d'éléments physiques de l'interconnexion ?

H. Arribart :

C'est une question qui concerne les matériaux composites. Aujourd'hui, les matériaux composites que nous utilisons, comme les boîtiers d'ordinateur et bien d'autres objets autour de nous, sont à base de polymères renforcés par des fibres qui, à 98 %, sont des fibres de verre - lorsqu'on a besoin de très hautes performances, on passe aux fibres de carbone ou aux fibres de kevlar.

Comme vous l'avez dit, toute l'idée des matériaux composites consiste à tirer le meilleur parti des deux mondes, en l'occurrence d'un polymère qui a l'avantage d'être léger mais qui, en même temps, se déforme facilement à la chaleur et n'a pas toujours une bonne durabilité chimique, et du minéral, à savoir le verre, qui, lui, apporte la rigidité, qui est la principale propriété qu'on recherche avec les matériaux composites.

Pour que cela marche, il faut que l'interface entre les deux soit bien conçue. C'est de l'architecture à l'échelle moléculaire, et, en particulier, il faut bien régler le niveau d'adhésion entre la fibre de verre et la surface. Cela passe par des agents, des molécules, qui sont formulés et doivent répondre à un cahier des charges très compliqué. Disons, en gros, que ces molécules sont là pour avoir le transfert de contrainte idéal entre la matrice (le polymère) et le renfort (les fibres de verre).

Votre question « Peut-on aller au-delà et avoir du verre renforcé par du verre ? » est une question d'actualité mais qui pose des problèmes. Aujourd'hui, ce qui se rapproche le plus de ce que vous suggérez, ce sont des composés céramique/céramique, ou des composites à matrice verre renforcée par des fibres de céramique, qui sont encore plus rigides que le verre. Ces fibres sont, par exemple, des fibres de carbure de silicium, qui sont des céramiques à tenue à très haute température, qui ont des propriétés mécaniques - rigidité notamment - plus importantes que le verre.

Quant à améliorer les propriétés du verre par du verre, je n'ai pas d'exemples en tête mais on peut certainement y penser. Je ne suis pas certain qu'il existe, aujourd'hui, un besoin pour des matériaux élaborés de cette façon. En revanche, je vois une grande difficulté à la mise en œuvre parce que les verres sont des matériaux qui se mélangent facilement les uns aux autres, donc garder l'intégrité de la fibre de verre dans une matrice de verre poserait un problème technique.

N. Milion :

Merci à tous.