Les applications modernes des verres dans les domaines de l'optique et de l'électronique

Claude GUILLEMET
claude@guillemet.org

Le verre a constamment été utilisé. Les procédés pour sa mise en forme, conçus au cours des siècles sont innombrables. Comme sa composition, et par conséquent ses propriétés, peuvent varier à l'infini, on a toujours réalisé de nouveaux produits en verre pour répondre à de nouveaux besoins. Notre époque n'échappe pas à la règle. Dans cet article, on décrit succinctement quelques utilisations modernes des verres dans les domaines de l'optique et de l'électronique. Nous verrons que ces applications avaient généralement été imaginées très tôt par les théoriciens. Il a fallu à chaque fois attendre l'invention d'un procédé performant pour que se développent à grande échelle de nouveaux produits.

L'optique instrumentale

On distingue les systèmes optiques selon le phénomène lumineux exploité.

L'optique dioptrique

L'optique dioptrique repose sur la réfraction de la lumière aux frontières des milieux transparents. Les performances des objectifs photographiques, notamment leurs ouvertures, ont été grandement améliorées grâce à l'emploi de machines de polissage à commandes numériques qui permettent de réaliser des lentilles

asphériques. Avec celles-ci, on supprime les aberrations géométriques (aberration sphérique, coma...). On parvient ainsi à réduire le nombre de lentilles qui entrent dans la composition des objectifs zoom et à les alléger. Les aberrations chromatiques résultent de la dispersion, c'est-à-dire de la variation de l'indice de réfraction avec la longueur d'onde. Le principe de leur correction est connu depuis le 18^e siècle : il consiste à associer des lentilles convergentes et divergentes taillées dans des verres de dispersions différentes. Aujourd'hui, le concepteur de systèmes

optiques dispose d'un choix étendu de compositions verrières. La *figure 1*, tirée du catalogue de Schott, montre les différentes catégories de verres d'optique, selon leur indice de réfraction et leur constringence (grandeur qui caractérise la dispersion).

L'optique des gradients d'indice

En 1854, J.C. Maxwell démontra la possibilité théorique de former des images avec des milieux à gradient d'indice. En 1905, R.W. Wood montra qu'un barreau transparent à section circulaire et dont l'indice

SPECTROGON

State of the art products

Filtres Interférentiels

De 200 à 15000 nm

- Passe-bande
- Passe-haut
- Passe-bas
- Large bande
- Densité neutre
- Disponible en stock

Réseaux Holographiques

De 150 à 2000 nm

- Compression d'impulsion
- Télécom
- Accordabilité spectrale
- Monochromateurs
- Spectroscopie
- Disponible en stock

UK (parle français): sales.uk@spectrogon.com • Tel +44 1592770000
 Sweden (headquarters): sales.se@spectrogon.com • Tel +46 86382800
 US: sales.us@spectrogon.com • Tel +1 9733311191

www.spectrogon.com

Crown		Flint	
Désignation	Verre	Désignation	Verre
LaSK	Crown lourd au lanthane	LaSF	Flint lourd au lanthane
LaK	Crown au lanthane	LaF	Flint au lanthane
SSK	Crown extra lourd	BaSF	Flint lourd au baryum
SK	Crown lourd	BaF	Flint au baryum
PSK	Crown lourd au phosphate	BaLF	Flint léger au baryum
PK	Crown au phosphate	SF	Flint lourd
BaK	Crown au baryum	F	Flint
K	Crown	LF	Flint léger
FPSK	Crown lourd au fluophosphate	LLF	Flint extra léger
FPK	Crown au fluophosphate	KF	Flint crown
FK	Crown au fluor	TIF	Flint au titane
BK	Crown au bore		

Figure 1. Les principales catégories de verres d'optique (d'après *Le Verre - Science et Technologie*, EDP Sciences, 2005).

est une fonction parabolique de la distance à son axe forme une image de grandissement 1. À partir de 1969 paraissaient les premières publications décrivant des procédés qui utilisent l'échange d'ions pour obtenir un gradient d'indice parabolique dans une baguette de verre, ce verre contenant des alcalin [1, 2]. L'intérêt pratique de tels procédés est qu'ils peuvent être miniaturisés : le barreau est réduit à la taille d'une fibre qui, après l'échange d'ions, est tronçonnée. L'une des principales applications actuelles concerne les photocopieurs où l'on emploie des rangées de telles petites lentilles à section plane pour former des images des lignes imprimées du document à reproduire [3].

L'optique dioptrique dans l'ultra-violet et dans l'infrarouge

Les verres courants sont à base d'oxydes (SiO_2 , B_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O ...). Ils sont transparents car ce sont des diélectriques. Ils ne contiennent pas d'électrons libres. Chaque électron est lié à un ion du réseau vitreux.

Du côté des courtes longueurs d'onde l'énergie lumineuse est absorbée, selon la théorie des bandes d'énergie dans les cristaux, lorsqu'elle est égale à l'énergie nécessaire pour qu'un électron change de niveau quantique. Pour les oxygènes des verres de silice, cette énergie vaut 10,3 eV c'est-à-dire que le verre de silice

Figure 2. Spectres de transmission du verre de silice, d'un verre de fluorure et d'un verre de chalcogénure (d'après *Le Verre - Science et Technologie*, EDP Sciences, 2005).

n'est plus transparent pour les rayonnements de longueur d'onde inférieure à 120 nm. Dès qu'on introduit d'autres oxydes que SiO_2 dans la composition, on crée des ions oxygène liés moins solidement au réseau vitreux et l'énergie à fournir pour faire changer d'état leurs électrons est moindre que dans le cas du verre de silice. Ces verres sont donc moins transparents dans l'ultra-violet que ne l'est le verre de silice pur. Les longueurs d'onde de coupure des verres de B_2O_3 et de P_2O_5 sont encore plus petites que celle du verre de silice mais ils sont trop hygroscopiques pour des applications courantes.

Du côté des grandes longueurs d'onde, l'absorption se produit quand la fréquence du rayonnement est égale à la fréquence propre de l'un des modes de vibration des molécules qui constituent le réseau

vitreux. Dans le cas du verre de silice, la fréquence propre de l'élongation de la molécule Si-O est de $0,34 \cdot 10^{14}$ Hz. Elle a donc lieu à 8900 nm pour le mode fondamental et à 4450 nm pour l'absorption due au premier harmonique qui est déjà très intense. La fréquence de la vibration moléculaire s'abaisse si les masses des deux ions augmentent et si l'énergie de leur liaison diminue. C'est ainsi que certains verres à base de fluorures de métaux lourds transmettent l'infrarouge jusqu'à 8000 nm (figure 2). Ils sont notamment utilisés, sous forme de fibre, pour l'évaluation des températures sans contact. Les verres de chalcogénures à base de S, Se ou Te sont transparents jusqu'à environ 15 000 nm mais, en revanche, ils sont opaques dans le visible (figure 2). Ces verres servent en particulier à réaliser des caméras pour la vision nocturne.

L'optique astronomique

Les astronomes utilisent des télescopes, instruments dans lesquels la lumière se réfléchit sur des miroirs. La qualité des miroirs a été grandement améliorée par l'emploi des « vitrocéramiques ». Une vitrocéramique est constituée de petits cristaux uniformément répartis dans une matrice vitreuse. Pour l'obtenir, on ajoute, en faible concentration, dans le mélange vitrifiable un agent de nucléation comme TiO_2 . Après la mise en forme, on applique

un traitement thermique spécial au cours duquel se produisent les nucléations puis se développe la croissance contrôlée des cristaux.

Un domaine de composition particulièrement attrayant est le système ternaire (Li_2O , Al_2O_3 , SiO_2) qui conduit à différents types de cristaux dont le coefficient de dilatation est très faible ou même négatif. Plusieurs vitrocéramiques de coefficient de dilatation de l'ordre de 10^{-7} K^{-1} sont commercialisées (Zerodur, Sital, ClearCeram, CerVit...).

Les fibres optiques

Les fibres optiques sont des fibres de verre qui conduisent la lumière. On distingue les fibres pour télécommunications et les fibres pour les liaisons à courte distance.

Les fibres pour télécommunications

En 1960, l'invention du laser, source de lumière cohérente, offrait la possibilité de transmettre un signal. Mais les fibres de verre qu'on produisait à l'époque ne permettaient pas de guider la lumière chargée de l'information sur une longue distance. D'une part, le signal perdait progressivement le long du trajet son intensité par suite de l'absorption et de la diffusion de la lumière. D'autre part, il était altéré car, selon leur inclinaison, les rayons lumineux parcouraient des longueurs différentes dans la fibre.

En 1970, les chercheurs de Corning apportèrent une solution en élaborant des fibres de silice par un procédé nouveau [4]. Au lieu de fondre du sable ou des cristaux de quartz, on produit le verre par l'hydrolyse ou l'oxydation de SiCl_4 en phase vapeur (figure 3). Le verre de silice se dépose par petits grains d'une grande pureté sur la surface interne d'un tube de verre. À la fin de l'opération, on ajoute à SiCl_4 un dopant comme GeCl_4 , puis on réchauffe le tube en faisant le vide à l'intérieur, ce qui provoque son rétreint (diminution de volume). On obtient ainsi une baguette (préforme) qui, étirée, produit la fibre au cœur de laquelle il y a un saut d'indice grâce au dopant. Ce type de fibre, après des améliorations successives, est aujourd'hui

Figure 3. Procédé de fabrication d'une préforme de fibre optique (d'après *Le Verre - Science et Technologie*, EDP Sciences, 2005).

Figure 4. Atténuation spectrale due à une fibre de silice avec ses différentes composantes (d'après *Le Verre - Science et Technologie*, EDP Sciences, 2005).

communément utilisé comme câble pour les liaisons téléphoniques.

Lorsqu'on observe le spectre d'absorption du verre de silice (figure 4), on constate que la transparence est maximale autour de 1500 nm. Les émetteurs généralement utilisés sont des diodes lasers infrarouges. Avec ces sources, il reste au bout d'un kilomètre de parcours, 95 % de l'énergie du signal. Pratiquement, avec son revêtement protecteur de polymère, la fibre a un diamètre de 150 micromètres (figure 5). Il est indispensable qu'elle fonctionne en monomode pour éviter les altérations du signal. Pour cela, la zone centrale ou cœur, où se propage la lumière, a un diamètre d'environ 10 micromètres et le saut d'indice par rapport à la gaine est 0,003.

Les fibres pour liaisons de courte distance

Lorsque le guidage de la lumière doit s'effectuer sur une distance inférieure à 100 m, il n'est plus nécessaire que la fibre

ON PEUT TOUT VOIR

Composants IR

Photodiodes PIN InGaAs

- IG17 – 500 nm jusqu'à 1700 nm
- IG22 – 500 nm jusqu'à 2200 nm
- IG26 – 500 nm jusqu'à 2600 nm

Sources IR

- DLS – 2500 nm jusqu'à 10000 nm

www.lasercomponents.fr

Figure 5. Structure d'une fibre optique (d'après Verre, vol 8, N°2, p. 43).

fonctionne en monomode. Le diamètre du verre de cœur est alors de l'ordre de 50 micromètres.

En informatique, les domaines d'application concernent notamment les liaisons des ordinateurs à des espaces de stockage mutualisés où les besoins en débits et en temps de réponse sont supérieurs à ceux d'un réseau local.

Pour observer des endroits difficiles d'accès ou dangereux, on a développé des « fibroscopes », endoscopes constitués d'un faisceau souple de fibres optiques avec un petit objectif d'un côté et un oculaire ou une caméra de l'autre. L'image produite par l'objectif sur la face d'entrée se retrouve sur la face de sortie du faisceau de fibres. Les fibroscopes sont particulièrement utilisés en médecine.

Le verre dans la technologie électronique

Nous citerons seulement deux exemples à grande portée économique.

Les écrans plats à cristaux liquides

Les écrans de télévision comportent le plus souvent un sandwich constitué de deux feuilles de verre enserrant des cristaux liquides. Sur leurs faces intérieures sont déposées sous forme d'un film mince des électrodes : une couche d'oxyde d'étain-indium pour la feuille avant et une matrice gravée dans une couche de silicium pour la feuille arrière. On introduit les cristaux liquides entre les deux feuilles espacées de 20 micromètres.

L'épaisseur des feuilles doit être voisine de 0,7 mm. Les ondulations de leurs surfaces ne doivent pas excéder 0,1 micromètre. Les traitements thermiques imposés par la fabrication de l'écran ne doivent pas entraîner de variations dimensionnelles

des feuilles ni d'altération de leurs surfaces. Pour éviter ces défauts, on préconise que la température de transition vitreuse (T_g) qui est la température à laquelle le verre passe de l'état solide à l'état de liquide visqueux, soit supérieure d'au moins 25 °C à la température maximale imposée par les traitements thermiques dus au procédé. Concrètement cette condition se traduit par $T_g \geq 600$ °C. Les dérivés fluorés dus aux traitements chimiques ne doivent pas altérer la surface des verres. Enfin, le verre ne doit pas contenir de sodium, susceptible de contaminer la couche de silicium.

Actuellement les feuilles de verre qui satisfont le mieux à ce cahier des charges sont obtenues par le procédé d'étrépage vers le bas de Corning (figure 6).

Le disque optique réinscriptible (DVD-RW)

Le DVD-RW comporte un substrat conducteur de la chaleur ; sur sa surface, on a déposé un film de 20 nm d'un chalcogénure cristallisé de formule $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$.

Avec un laser de 10 mW, on délivre des impulsions de 50 ns à la longueur d'onde de 650 nm. À cette longueur d'onde l'alliage est opaque. Ainsi, on fait fondre des microrégions de la couche mince et comme ces zones se refroidissent très rapidement, elles se vitrifient et de ce fait, leur coefficient de réflexion est inférieur à celui des régions non irradiées qui, elles, sont cristallisées. On a ainsi stocké une information exploitable avec un laser de lecture de 1 mW. Par la suite, si on élève la puissance du laser jusqu'à 4,5 mW, les régions vitrifiées sont portées à une température comprise entre la température de la transition vitreuse et la température de fusion et donc elles recristallisent et le disque est prêt pour un autre enregistrement. Cette opération peut être renouvelée 1000 fois sur le même disque [5].

Figure 6. Procédé d'étrépage vers le bas de Corning (d'après Le Verre - Science et Technologie, EDP Sciences, 2005).

Conclusion

De nombreuses applications actuelles du verre n'ont pas été évoquées au cours de ce rapide tour d'horizon : verres photochromiques, verres pour optique intégrée, verres actifs, verres photoniques, verres dopés, milieux amplificateurs en verre pour laser... Les recherches sur les verres sont très actives en France. Une association, l'USTV (Président : Daniel R. Neuville*), organise chaque année des symposiums où les chercheurs des secteurs public et privé se retrouvent et présentent leurs travaux dans ce domaine. Un rapprochement fructueux s'est produit au cours des dernières décennies entre l'Institut de Physique du Globe qui étudie les verres naturels et les laboratoires dont les recherches portent sur les verres artificiels.

Depuis Galilée, il existe entre l'Optique, science de la lumière et le verre qui transmet la lumière un lien indéfectible. Gageons que les prochaines années verront apparaître sur le marché de nouvelles réalisations fondées sur cette précieuse association.

*neuville@ipgp.fr

Références

- [1] Pearson A.D., French G., Rawson E.G. Preparation of a light focusing glass rod by ion-exchange techniques. *Applied Physics Letters* **15**, 76 (1969).
- [2] Boinot J.D., Guillemet C. Milieux formateurs d'image. *Proceedings IX^e Congrès International du Verre* **2**, 1223 (1971).
- [3] SELFOC, documentation commerciale.
- [4] Maurer R., Beck D., Schultz P. Optical wave guide Fibers. U.S. Patent N°3711262 (1970).
- [5] PIONEER. Documentation commerciale.