

La biréfringence du verre : une propriété remarquable pour l'ingénieur

FABRICE BERNARD*, LAURENT DAUDEVILLE**, RENÉ GY***

L'emploi du verre pour les structures du bâtiment (par exemple des poutres ; figure 1) est fortement pénalisé. Les bureaux français de contrôle pour la construction exigent en particulier des essais en vraie grandeur pour toute structure en verre à réaliser. Des règles très contraignantes concernent également les coefficients de sécurité utilisés classiquement en conception d'ouvrages. Elles sont dues à la baisse apparente de résistance du matériau dans le temps. Ce phénomène connu, appelé fissuration sous-critique, est dû à la propagation lente des défauts de surface lorsque ceux-ci sont ouverts sous l'effet du chargement et subissent un phénomène physico-chimique lié à une possible présence d'eau tendant à accroître les longueurs de ces défauts. Les exigences liées au coefficient de sécurité peuvent contribuer à dissuader l'utilisation du verre comme matériau de structure.



Figure 1. Poutres en verre trempé supportant une verrière

Afin d'assouplir ces règles en vigueur, une procédure de contrôle des structures permettant de vérifier in situ que des charges critiques ne sont pas dépassées s'avérerait particulièrement pertinente. Ceci est d'autant plus important pour les zones de connexion de telles structures dans lesquelles les états de contrainte, tridimensionnels, ne se déduisent pas de simples calculs de résistance des matériaux.

Cet article présente une méthodologie de contrôle in situ, non destructive, des structures en verre trempé. Celle-ci repose sur une utilisation originale de la photoélasticité, et permet de vérifier si un état de contrainte donné est atteint.

Un moyen de contrôle in situ : la photoélasticité

Principe

Le verre à analyser est placé dans un polariscope circulaire (encadré). Le rayon lumineux émergent du verre vibre selon les deux directions de contrainte contenues dans le plan perpendiculaire au trajet lumineux, les contraintes dont la direction est parallèle à ce trajet ne modifiant pas la pro-

pagation du rayon. On montre alors que le retard relatif de phase Δ qui se crée entre les deux vibrations suit les équations de Neumann :

$$\begin{cases} \frac{d\Delta}{dx_3} = C(\sigma_1 - \sigma_2) + 2 \frac{d\varphi}{dx_3} \sin \Delta \cot \kappa \\ \frac{d\kappa}{dx_3} = -\frac{d\varphi}{dx_3} \cos \Delta \end{cases}$$

κ est tel que $\tan \kappa = E_2/E_1$, où E_1 et E_2 sont les amplitudes de la vibration lumineuse le long des directions principales secondaires ($E_1 > E_2$). σ_1 et σ_2 sont les contraintes principales secondaires (dans le plan de la

plaque, c'est-à-dire sans tenir compte de la troisième direction qui ne contribue pas à la biréfringence), φ est l'angle des directions principales secondaires avec l'axe des polariseurs et C la constante photoélastique du verre.

La transparence du verre et son caractère biréfringent, lorsqu'il est sollicité, sont deux propriétés uniques dans le domaine des matériaux de construction. Pour utiliser de façon originale ces propriétés, il est nécessaire d'être en mesure de passer d'une image photoélastique à un état de contrainte, et réciproquement. La difficulté provient du caractère tridimensionnel des contraintes dans les zones d'assemblage qui rend non classique l'analyse photoélastique.

Simulation des images photoélastiques

Cas général

On a vu que le retard de phase Δ dépend des contraintes principales secondaires, et donc de l'état de contrainte, par l'intermédiaire des équations de Neumann. La résolution de ce système complet permet de déterminer le retard de phase Δ et donc l'intensité de la lumière. Les images photoélastiques peuvent être simulées par ce principe. Toutefois, la résolution des équations de Neumann est complexe, c'est un système d'équations différentielles non linéaires à coefficients non constants.

Le système se simplifie si l'angle φ ne dépend pas de x_3 , la coordonnée relative à la direction de propagation du rayon lumineux, c'est-à-dire si les directions principales secondaires restent toujours les mêmes le long du trajet optique. Dans ce cas, le système d'équations précédent devient :

$$\frac{d\Delta}{dx_3} = C(\sigma_1 - \sigma_2)$$

On se ramène alors au cas de la photoélasticité 2D, obtenu notamment pour une

Le polariscope

Le polariscope plan

Un polariscope plan se compose d'une source de lumière, blanche ou monochromatique, et de deux polariseurs. L'élément de verre à analyser se place entre les deux polariseurs (figure a).

Le rayon lumineux, émis par la source, traverse le premier polariseur. Il est alors astreint à vibrer selon une direction normale à celle de propagation déterminée par l'orientation du polariseur. Le rayon lumineux est alors polarisé rectilignement.

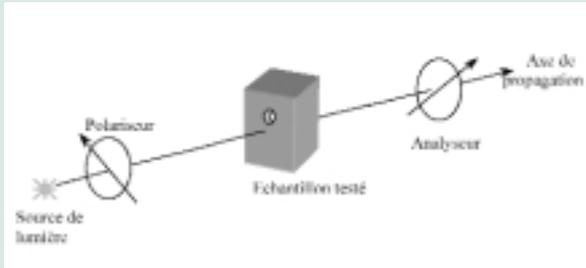


Figure a. Schéma de principe d'un polariscope plan

Si l'élément de verre à analyser est isotrope, la polarisation du rayon lumineux n'est pas modifiée lors de sa propagation. Le second polariseur joue le rôle d'analyseur et on peut alors trouver une position pour laquelle il éteint le rayon lumineux.

Comme plusieurs autres matériaux transparents non cristallins, le verre silico-sodocalcique est isotrope optiquement sous conditions normales mais devient biréfringent, comme un cristal, lorsqu'il est sollicité ; ses propriétés optiques changent alors et peuvent être représentées en chaque point par un ellipsoïde des indices. Ce phénomène est appelé biréfringence accidentelle ou photoélasticité. Ainsi lorsque le rayon lumineux atteint le verre chargé, il se divise immédiatement en deux vibrations dont les orientations suivent les deux directions principales de l'ellipsoïde des indices. Le second polariseur, appelé analyseur, ramène les deux vibrations dans le même plan et les fait s'interférer. L'intensité I de la lumière transmise s'écrit :

$$I = I_0 \sin^2 2\varphi \sin^2(\Delta/2)$$

où φ est l'angle entre les directions principales de l'ellipsoïde des indices et l'axe des polariseurs et Δ le retard relatif de phase entre les deux vibrations du rayon lumineux émergent.

Cette intensité est nulle si $\varphi = 0$ (modulo $\pi/2$) ou $\Delta = 0$ (modulo 2π).

Dans le premier cas, les franges noires s'appellent les isoclines ; elles correspondent aux lieux des points où les directions principales de l'ellipsoïde sont parallèles aux directions des axes des polariseurs.

Dans le second cas, les franges noires s'appellent les isochromes. En lumière blanche, chaque retard de phase correspond à une couleur bien précise.

Le polariscope circulaire

Un polariscope circulaire est obtenu à partir d'un polariscope plan auquel on ajoute deux lames quart d'onde entre lesquelles l'élément de verre à analyser est placé (figure b). Le rayon lumineux polarisé rectilignement par le premier polariseur rencontre la première lame quart d'onde : l'amplitude du vecteur lumineux émergent est constante, et la pointe du vecteur dessine un cercle lorsque l'onde se propage : le rayon lumineux est alors polarisé circulairement.

Dans le cas d'un verre biréfringent, le rayon lumineux présente, comme dans le cas du polariscope plan, deux directions de vibration. Il se propage alors au travers de la seconde lame quart d'onde, dont les axes rapide et lent sont opposés à ceux de la première lame. Le second polariseur, appelé analyseur, ramène là encore les deux vibrations dans le même plan et les fait s'interférer. L'intensité I de la lumière transmise s'écrit :

$$I = I_0 \sin^2(\Delta/2)$$

où Δ est le retard relatif de phase entre les deux vibrations du rayon lumineux émergent.

On voit donc que, pour une polarisation circulaire, seules les isochromes apparaissent, empêchant ainsi la superposition des deux types de franges noires, ce qui peut simplifier les interprétations notamment en lumière monochromatique.

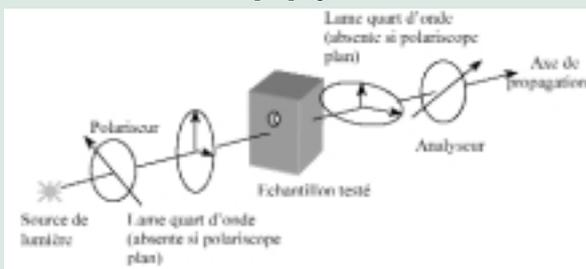


Figure b. Schéma de principe d'un polariscope circulaire

Politec Pi



Figure 2. Montage des essais réalisés pour la détermination de la résistance ultime de plaques de verre trouées

plaque de verre non trouée, placée dans un polariscope dont l'axe est normal au plan de la plaque, et qui est chargée dans son plan.

Cas de l'étude

Or, dans les zones de connexion des structures en verre (zones qui nous intéressent ici), la présence d'un trou à géométrie complexe ne permet pas une telle hypothèse. Il n'est plus possible de se ramener à une structure 2D en raison des chanfreins dans ces zones. C'est à 45° par rapport à la direction de chargement que le cisaillement σ_{12} est le plus important, et ce cisaillement n'est pas constant le long du trajet optique. Ainsi, les directions principales seront amenées à tourner, et le terme $d\phi/dx_3$ ne pourra pas être négligé. Les équations de Neumann doivent donc être considérées dans leur ensemble pour notre cas particulier.

Un programme développé spécifiquement pour notre application permet de réaliser une modélisation 3D d'images photoélastiques, modélisation permettant le passage à un état de contraintes et réciproquement. Il permet notamment de calculer soit le retard de phase et de comparer les isovaleurs prédites aux images obtenues expérimentalement en lumière blanche, soit l'intensité de la lumière et de rechercher les lieux d'extinction pour les comparer aux isochromes obtenues en lumière monochromatique.

Validation de la méthode

Campagne expérimentale

Afin de juger de la validité de ce programme d'analyse d'images photoélastiques, les résultats de prédiction des images sont comparés à des résultats expérimentaux.

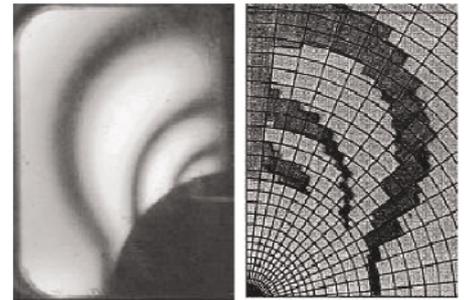


Figure 3. Images photoélastiques observées et calculées pour une plaque de type b1 et pour un chargement de 20 kN

La campagne expérimentale réalisée vise à déterminer les charges ultimes dans des zones d'assemblage de structures en verre. C'est en effet à cet endroit que les états de contrainte sont les plus complexes, la validation de l'approche sera donc pertinente. La figure 2 est une photographie d'un des essais réalisés.

La plaque de verre utilisée fait 350 mm de large, 600 mm de haut. L'axe du trou est à 125 mm du haut de la plaque. L'épaisseur est de 19 mm (épaisseur généralement maximale produite par les industriels, nécessaire dans le domaine du verre structural). Le verre est collé à deux flasques métalliques, reliées à une rotule fixée au bâti de la machine d'essais (MTS 50 tonnes). Un connecteur métallique, traversant le trou de la plaque de verre, est attaché à deux autres plaques fixées à la traverse horizontale de la machine d'essais. Il est ainsi assujéti à se déplacer verticalement, vers le haut à une vitesse contrôlée. Loin du trou, l'état de contrainte dans le verre est un état de traction. Le chargement est bien dans le plan de la plaque. La présence de la rotule assure la non-existence d'effort de torsion et de flexion. Différentes géométries

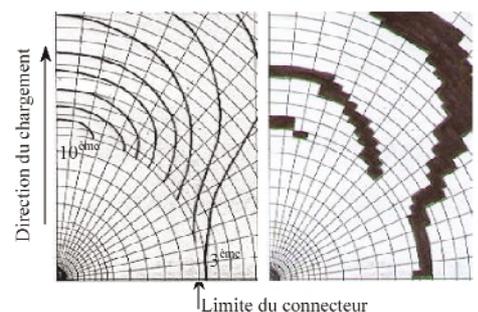


Figure 4. Différentes images photoélastiques de la plaque de verre au-dessus du connecteur, obtenues par simulation pour une force de 80 kN (a), 23 kN (b)

de trou sont étudiées : petit, moyen ou grand chanfrein, petit ou grand diamètre.

Un orifice est aménagé dans la plaque permettant de charger le connecteur métallique. C'est dans cette zone, située juste au-dessus et sur les côtés du trou que les mesures photoélastiques avec un polariseur ont été effectuées.

Validation du programme d'analyse d'images photoélastiques

La première étape de la validation du programme d'analyse d'images photoélastiques consiste à réaliser une simulation par éléments finis des essais afin d'obtenir l'état de contraintes dans la zone de connexion. Les hypothèses et la validation de cette modélisation ont été exposées dans un article intitulé "Sur le dimensionnement des structures en verre trempé", publié en 2002 dans la *Revue française de génie civil*.

La *figure 3* montre la comparaison entre les images photoélastiques visualisées au cours d'un essai pour un chargement donné et une géométrie donnée, avec les images photoélastiques simulées. Les résultats de la simulation sont donc en bon accord avec les résultats expérimentaux.

Application de la méthode : utilisation pour le contrôle *in situ*

Ainsi, en analysant des images photoélastiques obtenues sur des structures existantes, l'état de contraintes dans le matériau peut être prédit. Il est également possible de vérifier si la tension extérieure appliquée excède en valeur absolue la précompression de surface induite par la trempe thermique. Un dimensionnement à cet état limite est pertinent car un verre, dont la surface n'est pas sous tension, est indemne de fissuration sous-critique. Il a été montré que pour des zones d'assemblage comportant un trou à grand chanfrein et à grand diamètre ($\phi_{\text{ext}} = 56$ mm), la surface se décomprime à partir de 80 kN.

La *figure 4* présente alors l'image photoélastique simulée correspondant à un tel chargement ainsi que celle correspondant à la charge de décompression de la surface divisée par un coefficient de sécurité de 3,5, valeur inférieure à celle aujourd'hui utilisée. En effet, le coefficient partiel dû au phénomène de fissuration sous-critique peut être supprimé car, avec un dimensionnement à un tel état limite, le verre ne voit pas sa résistance diminuer dans le temps.

Perspectives

Ce travail s'inscrit dans le contexte du "verre structurel", c'est-à-dire l'utilisation du verre pour les structures du génie civil. Le manque de connaissances réellement approfondies du comportement mécanique de ce matériau à long terme conduit à le défavoriser pour de telles applications. Des essais en vraie grandeur et des coefficients de sécurité élevés sont exigés par les bureaux de contrôle pour la validation de la construction.

Pour assouplir ces méthodes de dimensionnement en vigueur, nous proposons donc l'utilisation de la photoélasticité pour le contrôle *in situ* des structures existantes. Nous avons montré que la simulation des images photoélastiques, permet de relier état de contraintes et franges isochromatiques. L'originalité de notre travail est la prise en compte du caractère tridimensionnel de l'état de contraintes dans les zones de connexion. Le programme d'analyse d'images décrit dans cette étude permet ainsi l'intégration d'une possible rotation des directions principales secondaires dans l'épaisseur de la plaque, c'est-à-dire le long du trajet optique de la lumière. Cette méthode permettra à terme de vérifier *in situ* l'état de la structure en verre, notamment pour chercher à savoir si la surface du verre est décomprimée ou non, et donc être ainsi en mesure de dresser des certificats de garantie.

Références

- Aben H, Guillemet C. Photoelasticity of Glass. Berlin : Springer-Verlag, 1993.
- Bernard F, Daudeville L, Gy R. Sur le dimensionnement des structures en verre trempé. *Revue Française de Génie Civil* 2002;6(7-8):1359-80.

Politec Pi