
Une mesure des contraintes pour le contrôle en service des structures en verre

Fabrice Bernard* — **Laurent Daudeville**** — **René Gy*****

* *Ecole des Mines de Douai, Département Génie Civil
941 rue Charles Bourseul, F-59508 Douai cedex
bernard@ensm-douai.fr*

***Laboratoire Sols, Solides, Structures
Domaine Universitaire, F-38041 Grenoble cedex 9*

*** *Saint-Gobain Recherche
39 quai Lucien Lefranc, F-93303 Aubervilliers cedex*

RÉSUMÉ : Dans ce travail, nous proposons d'utiliser de façon originale la transparence du verre et son caractère biréfringent (photoélasticité), deux propriétés uniques dans le domaine des matériaux de construction. Une simulation d'images photoélastiques est présentée, permettant le passage à un état de contraintes, et réciproquement. Cette simulation est tridimensionnelle afin de prendre en compte la non-invariance des directions principales secondaires du chargement dans l'épaisseur d'une plaque de verre. Ceci a été réalisé en calculant la valeur du champ électrostatique de la lumière le long du trajet optique, à partir des équations de Maxwell. Cette méthodologie est validée par comparaison avec des images photoélastiques obtenues au cours d'expérimentations. L'objectif de ce travail est d'établir une procédure in situ de contrôle des structures réalisées, qui rendrait possible l'établissement de certificats de garantie. Les exigences actuellement en vigueur des bureaux de contrôle pour la construction pourraient ainsi être assouplies.

ABSTRACT: In this study, we propose to use in an original way the glass transparency and its birefringency property (photoelasticity), two unique properties among building materials. A prediction of photoelastic fringes is presented, allowing a relationship with a stress state, and reciprocally. This modelling is three dimensional in order to take into account the non invariance of the secondary principal directions of the loading in the thickness of a glass plate. The prediction of photoelastic fringes is carried out by calculating the light electrostatic vector modulus along the optical way, starting from the Maxwell's equations. This methodology is validated by comparison with photoelastic images obtained during experiments. The objective of this work is to establish an in situ control process of glass structures, which would allow the establishment of guarantee certificates. The current design methods could thus be optimised.

MOTS-CLÉS : photoélasticité, verre structurel, trempe thermique, contraintes résiduelles

KEY WORDS: photoelasticity, structural glass, thermal tempering, residual stresses

1. Introduction

Deux principaux phénomènes sont à l'origine du relatif faible emploi du verre pour les structures du Génie Civil (par exemple des poutres ou des poteaux, cf. figure 1).

Sa fragilité, d'abord, fait peur : en effet, la moindre fissuration superficielle peut faire chuter la résistance de plusieurs ordres de grandeurs. Ainsi, une fibre de verre fraîchement réalisée présente une résistance en traction de 10 GPa, alors qu'en pratique, les vitrages non trempés ont une résistance rarement supérieure à 40 MPa. Le verre, ensuite, est un matériau présentant un phénomène de propagation sous critique des fissures [MIC 83]. Sous chargement constant, n'entraînant pas un dépassement de la ténacité, une lente propagation des défauts de surface a lieu, en raison d'une réaction chimique en pointe de fissure entre le verre et l'humidité ambiante (transformation des liaisons siloxanes en liaisons silanols).



Figure 1. Arrêt de tramway Braunschweiger Platz à Heilbronn

Ainsi, faute de connaissances vraiment approfondies du comportement du matériau à long terme, les bureaux de contrôle pour la construction exigent d'une part des essais en vraie grandeur très coûteux, et d'autre part, un coefficient de sécurité global pour le dimensionnement à l'état limite ultime de l'ordre de 7, particulièrement dissuasif. Le coefficient global résulte de coefficients partiels notamment celui d'une valeur 2 qui vient de l'estimation de la perte de résistance du verre sur des durées de vie demandées dans le bâtiment (50 ans).

Néanmoins, pour diminuer la sensibilité du verre aux endommagements de surface, il existe des méthodes de renforcement, la plus intéressante en vue d'applications structurales étant la trempe thermique qui consiste à refroidir brutalement, par jets d'air, un verre chauffé à plus de 600°C. On obtient alors une mise en compression de la surface du matériau (de 100 à 300 MPa couramment) ; la résistance est donc augmentée puisque pour casser le verre il faudra d'abord vaincre cette précompression de surface, et on obtient une certaine immunité vis-à-vis de la fissuration sous-critique tant que les défauts de surface ne sont pas ouverts, c'est-à-dire tant que les contraintes appliquées n'excèdent pas en valeur absolue la précompression surfacique. Dès lors, dimensionner une structure en verre à l'Etat Limite de Service correspondant à la décompression de la surface devrait permettre de supprimer le coefficient partiel 2 si pénalisant. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de pouvoir calculer avec précision les contraintes résiduelles générées par le processus de trempe thermique pour la prédiction de l'état limite de service ainsi que son écart, en terme de chargement, avec l'état limite ultime. En outre, disposer de moyens de contrôle de la structure vis-à-vis de ces états limites, fiables et faciles à mettre en œuvre, permettrait d'être en mesure de dresser des certificats de garantie.

Cet article présente la façon dont nous avons résolu ces différents points, en se focalisant sur les zones les plus complexes d'une structure : les assemblages. Dans un premier temps, nous présentons notre méthode de contrôle in situ des structures qui est basée sur la photoélasticité. Dans un second temps nous montrons la façon dont nous avons réussi à calculer de manière fine les contraintes résiduelles du processus de trempe thermique. Enfin, nous nous servons de ces résultats pour simuler les images photoélastiques pour quelques états de contraintes critiques sur structures (décompression de la surface pondérée ou non par un coefficient de sécurité).

2. Un moyen de contrôle in situ : la photoélasticité

La transparence du verre et son caractère biréfringent, lorsqu'il est sollicité, sont deux propriétés uniques dans le domaine des matériaux de construction qu'il est proposé d'utiliser de façon originale.

Pour cela, il est nécessaire d'être en mesure de passer d'une image photoélastique à un état de contraintes, et réciproquement. Par la suite, les principes de la photoélasticité et de la polariscopie seront rappelés, puis sera présentée une méthode de simulation des images photoélastiques basée sur l'exploitation des résultats de simulations par Eléments Finis. L'originalité du travail présenté provient du caractère tridimensionnel des contraintes dans les zones d'assemblage qui rend complexe l'analyse photoélastique.

2.1. Polariscopie et photoélasticité

Un polariscope plan se compose d'une source de lumière, blanche ou monochromatique, et de deux polariseurs. A cela, on ajoute deux lames quart d'onde pour faire un polariscope circulaire. L'élément de verre à analyser se place entre les deux polariseurs ou les deux lames quart d'onde (figure 2).

Le rayon lumineux, émis par la source, traverse dans un premier temps le premier polariseur. Il est alors astreint à vibrer dans un plan normal à la direction de propagation déterminé par l'orientation du polariseur. Le rayon lumineux est polarisé rectilignement. Si une lame quart d'onde, avec un axe incliné à 45° par rapport au polariseur, est présente, l'amplitude du vecteur lumineux émergent est constante, et la pointe du vecteur dessine un cercle lorsque l'onde se propage : le rayon lumineux se propage circulairement.

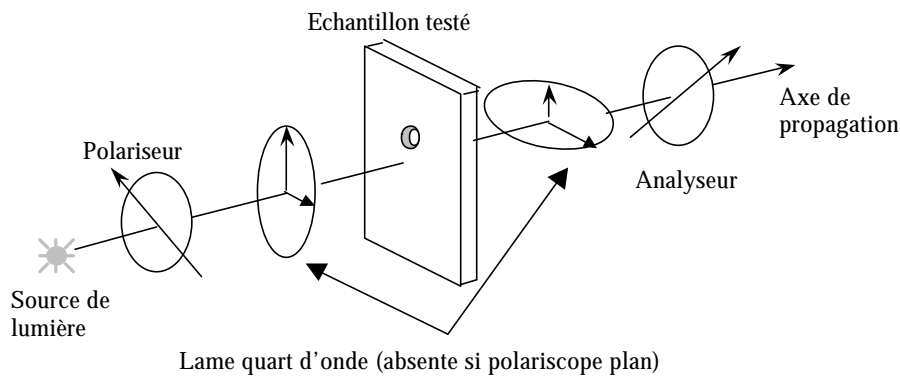


Figure 2. Schéma de principe d'un polariscope (plan ou circulaire)

Le rayon lumineux continue alors de se propager et rencontre le verre. Celui-ci, comme plusieurs autres matériaux transparents non cristallins, est isotrope optiquement sous conditions normales mais devient biréfringent, comme un cristal, lorsqu'il est sollicité. Ce phénomène est appelé biréfringence accidentelle ou photoélasticité [ABE 93].

Les propriétés optiques du verre peuvent être représentées en chaque point par un ellipsoïde des indices dont les axes principaux coïncident avec les directions principales des contraintes. Ainsi lorsque le rayon lumineux atteint le verre, il se divise immédiatement en deux vibrations dont les orientations suivent les deux directions principales secondaires, c'est-à-dire les deux directions relatives au plan, dans le matériau, perpendiculaire à l'axe de

propagation de la lumière. La troisième direction ne contribue pas à la biréfringence puisque la vitesse de propagation d'un rayon de lumière n'est pas régie par l'alignement de matière le long de ce rayon, mais par la nature du milieu normalement au rayon.

Le retard relatif de phase Δ qui se crée entre les deux vibrations suit les équations de Neumann [ABE 93] :

$$\begin{cases} \frac{d\Delta}{dx_3} = C(\sigma_1 - \sigma_2) + 2 \frac{d\varphi}{dx_3} \sin\Delta \cot\kappa \\ \frac{d\kappa}{dx_3} = -\frac{d\varphi}{dx_3} \cos\Delta \end{cases} \quad [1]$$

κ est tel que $\tan\kappa = E_1/E_2$ 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 direction 3 est celle de la propagation.

Dans le cas de la polariscopie circulaire, après avoir traversé le verre, le rayon lumineux se propage au travers d'une 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 les deux vibrations dans le même plan et les fait donc s'interférer. L'intensité I de la lumière transmise s'écrit, dans le cas d'un polariseur champ sombre :

$$\begin{cases} I = I_0 \sin^2 2j \sin^2(\Delta/2) & \text{pour un polariscopie plan} \\ I = I_0 \sin^2(\Delta/2) & \text{pour un polariscopie circulaire} \end{cases}$$

Pour un polariscopie plan, cette intensité s'annule si $\varphi \equiv 0 (\pi/2)$ ou $\Delta \equiv 0 (2\pi)$.

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

Dans le second cas, les franges sombres s'appellent les franges isochromes. En lumière blanche (toutes les longueurs d'onde), chaque retard de phase correspond à une couleur bien précise, dont l'échelle de correspondance se trouve par exemple dans [AVR 84]. Les franges isochromes sont d'autant plus nombreuses que la différence entre les contraintes principales secondaires est grande. Pour une polarisation circulaire, seules les franges isochromes apparaissent, empêchant ainsi la superposition des deux types de franges sombres, ce qui peut simplifier les interprétations notamment en lumière

monochromatique (en particulier le repérage et le comptage des franges est facilité).

2.2. Simulation des images photoélastiques

2.2.1. Discussion

Le retard de phase Δ dépend des contraintes principales secondaires, et donc de l'état de contraintes, par l'intermédiaire des équations de Neumann [1]. 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 [1] devient :

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

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

Or, dans les zones de connexion des structures en verre, 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, ce cisaillement n'est pas constant le long du trajet optique, dans la direction x_3 [BER 01]. Ainsi, les directions principales seront amenées à tourner, et le terme $d\varphi/dx_3$ ne pourra pas être négligé. Les équations de Neumann [1] doivent être considérées dans leur ensemble pour notre cas particulier.

Il est possible de montrer que ce système est équivalent au système matriciel suivant, obtenu à partir des équations électromagnétiques de Maxwell ([ABE 00], [ABE 93]) :

$$\frac{d[E]}{dx_3} = -\frac{i\pi C}{\lambda} \begin{bmatrix} \sigma_{11}(x_3) - \sigma_{22}(x_3) & 2\sigma_{12}(x_3) \\ 2\sigma_{12}(x_3) & -(\sigma_{11}(x_3) - \sigma_{22}(x_3)) \end{bmatrix} [E] \quad [2]$$

que l'on notera :

$$\frac{d[E]}{dx_3} = M(x_3) \cdot [E]$$

[E] désigne le vecteur champ électrique, λ est la longueur d'onde de la lumière, σ_{ij} sont les composantes du tenseur des contraintes dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation de la lumière.

2.2.2. Principe

L'intégration de cette équation différentielle peut être réalisée à l'aide d'un schéma de Cranck-Nicholson [BER 04a] :

$$\frac{E(x_3 + \Delta x_3) - E(x_3)}{\Delta x_3} = M(x_3) \left(\frac{E(x_3 + \Delta x_3) + E(x_3)}{2} \right)$$

Ce qui donne l'expression du vecteur E à l'altitude $x_3 + \Delta x_3$ à partir de sa valeur à l'altitude x_3 (I_d est la matrice identité) :

$$E(x_3 + \Delta x_3) = \left[I_d - \frac{\Delta x_3}{2} M(x_3) \right]^{-1} \left[I_d + \frac{\Delta x_3}{2} M(x_3) \right] E(x_3)$$

Ainsi, nous ne faisons plus l'hypothèse d'invariance des directions principales secondaires dans l'épaisseur de la plaque (invariance du cisaillement dans le plan de la plaque suivant la direction 3). Cette hypothèse vient de la diagonalisation de la matrice M, qui fait apparaître la matrice de changement de repère où intervient l'angle φ des directions principales secondaires, considéré indépendant de x_3 .

Le choix de la méthode de mesure, polariscopie circulaire ou polariscopie rectiligne, conditionne dans ces calculs la valeur initiale du vecteur E_0 , et de l'analyseur final. Comme seul compte le rapport de l'intensité lumineuse transmise sur l'intensité incidente, la norme du vecteur E_0 est arbitrairement fixée à 1 au début. La valeur de l'intensité lumineuse après passage dans l'analyseur vaut :

$$I_{\text{transmise}} = \langle (E, A) \rangle^2$$

A est un vecteur dont la direction est donnée par l'axe de l'analyseur. Ainsi, selon les montages, nous obtenons :

— En polarisation circulaire

$$E_0 = \begin{pmatrix} i/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} -1/\sqrt{2} \\ -i/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

— En polarisation rectiligne :

– si le polariseur fait un angle nul avec l'horizontale :

$$E_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

– si le polariseur fait un angle de $+45^\circ$ avec l'horizontale :

$$E_0 = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} -1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} \end{pmatrix}$$

L'intensité I de la lumière est égale au carré de la norme du vecteur champ électrostatique et est reliée au retard de phase Δ par l'expression donnée précédemment.

Un programme, écrit en FORTRAN, est réalisé [BER 01]. Ce programme lit le fichier de données généré par le logiciel aux Eléments Finis (état de contraintes en chaque point de Gauss) et permet de calculer :

– le retard de phase et comparer les isovaleurs prédites aux images obtenues expérimentalement en lumière blanche (dans le cas de la lumière polarisée rectilignement, l'angle φ s'obtient en cherchant les vecteurs propres de la matrice 2×2 des contraintes relatives au plan de la plaque),

– ou l'intensité de la lumière et rechercher les lieux d'extinction (c'est-à-dire où l'intensité est nulle) pour les comparer aux isochromes obtenues en lumière monochromatique (une seule longueur d'onde).

La validation de ce programme d'analyse d'images est bien montrée dans [BER 04a].

3. Calcul des contraintes résiduelles de trempe

Actuellement, les contraintes résiduelles dues au processus de trempe thermique ne sont calculées avec précision que dans des plaques infinies, c'est-à-dire dans des zones éloignées des bords et des éventuels trous (problème 1D). L'étude près des bords (problème 2D) a été effleurée par certains auteurs [CAR 99] [LAU 99], mais sans prendre en compte de manière exhaustive les échanges thermiques intervenant pendant le processus. L'originalité de ce travail est de réaliser cette étude de manière complète, non seulement près des bords, mais aussi dans les zones chanfreinées des trous de la plaque de verre (problème 3D). Pour cela, la méthode des Eléments Finis est utilisée. Un calcul

thermomécanique découplé est réalisé. Il est donc nécessaire de connaître le comportement mécanique du verre au cours de la trempe, ainsi que l'historique des températures au cours du processus. Les différents phénomènes d'échanges thermiques sont ainsi étudiés. Dans cette étude, cinq géométries de trou ont été étudiées (figure 3 et tableau 1).

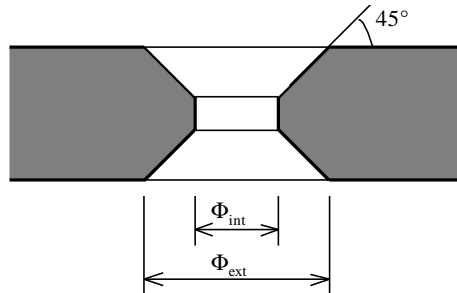


Figure 3. Géométrie des différents types de trous

Désignation	Φ_{int} (mm)	Φ_{ext} (mm)
a1	38	40
a2	54	56
b1	24	40
b2	40	56
c1	30	40

Tableau 1. Géométrie des différents types de trous

3.1. Comportement mécanique du verre au cours de la trempe

Un modèle de comportement thermomécanique [NAR 71] incluant les différents phénomènes de relaxation de contraintes et faisant actuellement référence a été implanté dans ABAQUS. Une description complète du modèle et des résultats de simulation du processus de trempe ont été présentés [BER 02a]

Aux températures ambiantes jusqu'à 450°C environ, le verre se comporte comme un solide élastique, tandis qu'aux températures élevées, il possède les propriétés d'un liquide visqueux. Le passage d'un comportement à l'autre est continu ; on n'observe pas de fusion franche comme pour les solides cristallins, mais plutôt un phénomène de ramollissement progressif. Dans ce domaine intermédiaire, le verre montre un comportement viscoélastique, thermorhéologiquement simple et soumis à la «relaxation structurale». Le comportement viscoélastique est modélisé par l'intermédiaire d'un modèle de Maxwell généralisé [GY 94].

La simplicité thermorhéologique traduit le fait que la température et le temps ne sont pas deux variables d'état indépendantes. Le verre présente le même comportement à différentes températures. Seule la vitesse des mécanismes microstructuraux de réorganisation, tel le temps moyen de relaxation, varie. Ainsi, si le comportement du verre est connu à une température de référence, il peut être déterminé à n'importe quelle autre température. L'élimination d'une variable entre le temps et la température se fait par l'intermédiaire du temps réduit $\xi(T)$ défini comme le rapport de la viscosité à la température T et la viscosité à la température de référence [GY 94].

La «relaxation structurale» est une conséquence directe de la définition thermodynamique d'un verre, et traduit le fait que, suivant la vitesse adoptée pendant la trempe, le verre n'aura pas le même état structural. Ce phénomène est pris en compte grâce à la notion de température fictive, qui représente la température du liquide qui est dans le même état structural que le verre en question [TOO 46].

Le modèle de Narayanaswamy consiste en la superposition de ces deux phénomènes de relaxation : on fait jouer à la température fictive le même rôle que la température réelle.

3.2. Identification des phénomènes d'échange thermique au cours de la trempe

Le refroidissement brutal par jets d'air est modélisé numériquement par une convection forcée. Loin des bords, cette convection forcée est caractérisée par un coefficient de transfert thermique et par la température de l'air. Pour la modélisation de la trempe de plaques trouées, plusieurs coefficients sont définis (dans le trou, sur les bords droits). En outre, aux températures auxquelles commence la trempe, intervient un autre transfert de chaleur : le rayonnement thermique, c'est-à-dire un échange de chaleur entre deux corps à des températures différentes. Pour le rayonnement thermique, les longueurs d'onde sont dans l'Infra-Rouge (IR) et sont comprises entre 0,75 et 50 μm environ. Le rayonnement est complexe dans les milieux semi-transparents : on a échange de chaleur non seulement entre la surface du verre et les surfaces extérieures, mais aussi entre son volume et l'extérieur, alors que pour la plupart des autres matériaux du génie civil, les ondes sont arrêtées par les premières couches moléculaires qu'elles rencontrent [BAN 90].

3.2.1. Traitement du rayonnement thermique

Le modèle thermique utilisé est une approche simplifiée fondée sur une séparation des puissances radiatives volumique et surfacique. Pour calculer ces puissances, le modèle fait appel aux émissivités surfacique et volumique des feuilles de verre, grandeurs qui sont définies comme suit :

– l'émissivité surfacique est la grandeur utilisée pour le domaine spectral où le verre est opaque, les échanges radiatifs n'ont lieu qu'à l'interface ;

– l'émissivité volumique est la grandeur utilisée pour le domaine spectral où le verre est semi-transparent, les échanges radiatifs interviennent dans tout le volume du verre.

On peut retrouver l'expression analytique de ces émissivités. Elles font notamment intervenir l'intégrale sur les longueurs d'onde correspondant à chaque domaine spectral des émissivités monochromatiques pondérées par la fonction de Planck (émissivité d'un corps noir). Ces deux valeurs sont alors déterminées expérimentalement dans le cas de plaques infinies (expressions 1D) pour plusieurs températures moyennes de feuilles et sont mises sous une forme polynomiale. Ceci est directement utilisable par le module thermique du code aux Eléments Finis ABAQUS [BAN 90].

En chaque point de Gauss i , le flux radiatif émis (respectivement absorbé) est calculé en multipliant l'émissivité volumique par la valeur σT_i^4 (respectivement σT_{ext}^4) où σ est le coefficient de Stefan-Boltzmann, et en divisant le produit obtenu par l'épaisseur de la plaque de verre en ce point de Gauss. Pour les mailles de surface, on ajoute le flux correspondant au domaine spectral opaque, qui résulte d'un calcul similaire avec l'émissivité surfacique. Cette méthode a l'avantage d'être peu coûteuse en temps de calcul.

L'adaptation de cette méthode aux zones proches du trou et des bords est faite en conservant les expressions des émissivités identifiées à partir de calculs unidimensionnels.

3.2.2. Identification des coefficients d'échange convectif

Les coefficients de convection forcée dans les différentes zones des plaques trouées ont été déterminés à l'aide d'une maquette métallique en aluminium, creuse, représentant la surface extérieure d'une plaque de verre de 40×40 cm et de 19 mm d'épaisseur. Chacune des pièces de la maquette a été instrumentée de thermocouples. La figure 4 montre des clichés de cette maquette [BER 02a].



Figure 4. *Différentes vues de la maquette (vue de dessus, et zoom sur les constituants autour du trou)*

La maquette a ensuite été placée dans des conditions réelles de trempe (sur une ligne de production de la société Saint-Gobain) mais a été portée à une température telle que le rayonnement est négligeable. Les thermocouples ont permis de connaître l'historique des températures en différents points de la maquette. La résolution de l'équation de la chaleur sur ces essais nous permet d'identifier les coefficients d'échange convectif vrais sur chacune des surfaces soumises au refroidissement par air : sur les faces de la plaque, sur les bords droits et sur toutes les faces du trou chanfreiné. Il est supposé que ce refroidissement est symétrique par rapport au plan médian de la plaque de verre [BER 01] [BER 05]. Les coefficients d'échange identifiés sont relatifs à un processus industriel et à une géométrie d'éprouvette donnés. La prédiction des coefficients d'échange convectifs pour d'autres processus industriels ou géométries nécessiterait une étude approfondie des mouvements d'air autour des différentes surfaces et des échanges thermiques générés. Une étude simplifiée est néanmoins possible à partir de concepts issus de l'analyse dimensionnelle.

3.2.3. *Simulation de la trempe thermique et détermination des contraintes résiduelles*

Nous disposons ainsi d'un modèle, implanté dans ABAQUS, permettant d'appréhender le comportement mécanique du verre en fonction de la température. En outre, les différents transferts de chaleur dans le verre sont modélisés, et les conditions thermiques aux limites ont été identifiées pour les différentes géométries de trous. Les contraintes résiduelles issues du processus de trempe peuvent ainsi être calculées. Cette simulation est menée en condition d'axisymétrie. La finesse du maillage a été déterminée par une étude de sensibilité. Les éléments utilisés sont des éléments bilinéaires à 4 nœuds (CAX4 dans ABAQUS).

Pour comparer les valeurs calculées à des valeurs expérimentales, nous disposons d'outils de mesure de contraintes résiduelles dont le principe de fonctionnement est basé sur la photoélasticité. Il s'agit :

- de l'*Epibiascope* pour la mesure des contraintes superficielles ([GUI 62] cité par [ABE 93]) ; cet appareil envoie un rayon de lumière parallèlement à la surface de la plaque sur une courte distance ; la contrainte normale à la surface étant nulle, on récupérera directement la valeur de la contrainte tangentielle d'après les principes de la photoélasticité 2D (pas d'effet tridimensionnel) ;

- du *contrôleur de bord* pour la mesure des contraintes de membrane (moyenne dans l'épaisseur de la différence des contraintes principales) ;

d'après les principes de la photoélasticité 2D également, au niveau du bord même, on obtiendra la moyenne sur l'épaisseur de la contrainte tangentielle [ABE 93];

– d'un *montage spécifique* que nous avons réalisé pour la mesure des contraintes de membrane dans les zones chanfreinées du trou.

En effet, avec un rayon qui arriverait sur le chanfrein en faisant avec lui un angle de 45° , on aurait réflexion et réfraction (déviation du rayon lumineux selon les lois de Descartes). Le trajet suivi ensuite serait trop compliqué pour être analysé. Ce serait aussi trop difficile d'envoyer un rayon perpendiculairement au chanfrein. Par conséquent, nous remplissons le trou d'un liquide du même indice optique que le verre (1,51). Nous projetons un rayon lumineux avec le polariscope perpendiculairement à la surface de ce liquide. Ce rayon traverse alors le verre de part et d'autre sans être dévié. La figure 5 ci-dessous est une coupe de ce montage suivant un diamètre du trou.

Dans l'analyse photoélastique des contraintes, il faut prendre en compte l'amincissement de la plaque. On obtient donc aussi la moyenne dans l'épaisseur de la différence des contraintes principales (ou contraintes de membrane).

L'erreur relative de mesure des contraintes résiduelles à l'aide de ces deux instruments est de l'ordre de 10%.

La validation de la modélisation est ainsi effectuée par comparaison des valeurs des contraintes résiduelles prédites par le calcul et celles mesurées par photoélasticité. Aucun paramètre supplémentaire n'a été identifié pour l'obtention des résultats de simulation qui suivent. La température initiale de trempe et la température de l'air soufflé sont fournies par le fabricant : $T_0 = 630^\circ\text{C}$ et $T_{\text{ext}} = 20^\circ\text{C}$.

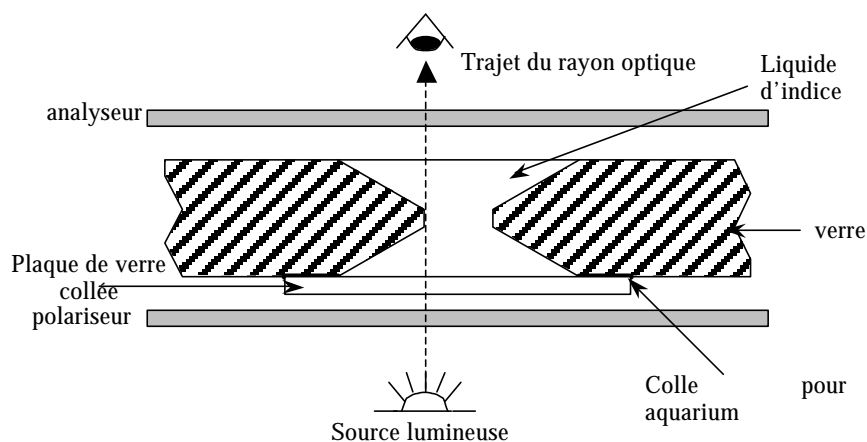


Figure 5. Montage pour mesure des contraintes résiduelles de trempe dans le trou

La contrainte superficielle calculée loin des bords est de -144 MPa, alors que la mesure a donné -147 MPa, soit un écart de 2%. La comparaison la plus pertinente est celle faite au voisinage des trous et des bords. Ici aussi, la bonne concordance entre les valeurs calculées et mesurées valide la modélisation proposée du processus de trempe thermique (figures 6 et 7).

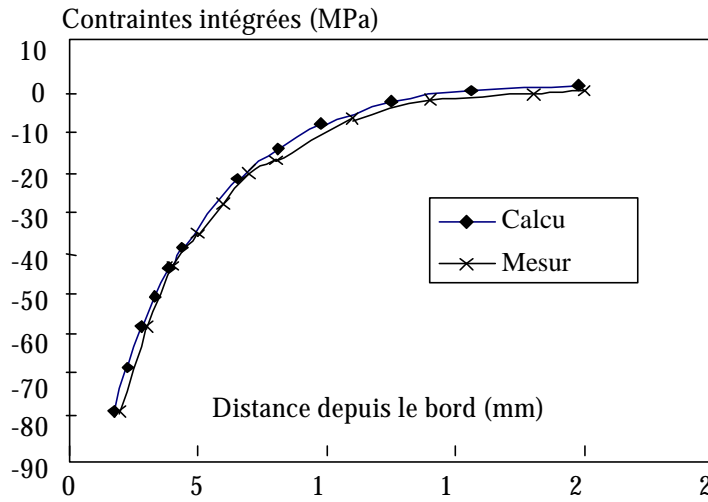


Figure 6. Contraintes de membrane mesurées et calculées (les mesures commencent après le joint-bord plat industriel)

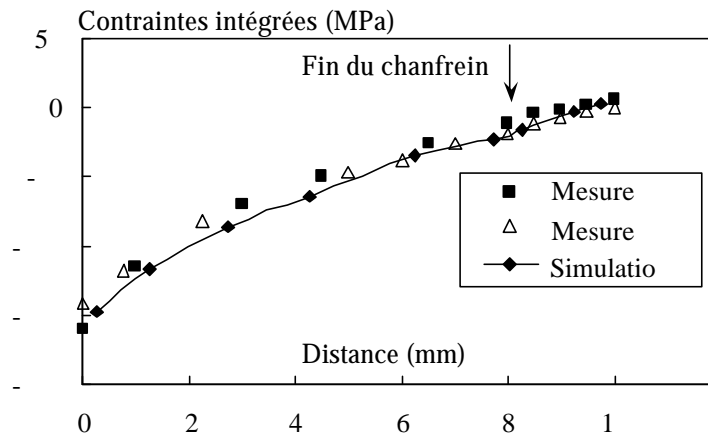


Figure 7. *Contraintes de membrane mesurées et calculées (trou à grand chanfrein)*

4. Application : simulation d'images photoélastiques caractéristiques

Il semble maintenant possible de passer d'un état de contrainte à une image photoélastique et réciproquement. 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 une possible décompression de la surface par analyse inverse ou quantifier l'écart de contraintes avant cette décompression, et être en mesure de dresser ou non des certificats de garantie.

La réalisation d'éléments en verre de longue portée ou de poutres profilées (section à grande inertie, en I par exemple, afin d'augmenter la stabilité mécanique) est l'objectif de ce travail. Ces éléments se caractérisent, par rapport aux éléments courants (façades...) par des chargements dans le plan des plaques de verre.

La simulation numérique de chargements typiques, dans les zones de connexion, est détaillée dans [BER 04b] ou [BER 02b]. La validation s'est faite par comparaison à des résultats obtenus lors d'une campagne expérimentale. La décompression de la surface peut alors être estimée. Par exemple, pour des zones d'assemblage comportant un trou de type b2 (cf. tableau 1) avec un chargement du connecteur dans le plan de la plaque et un pré-serrage de 2 daN.m, la surface se décomprime à partir de 80 kN [BER 01]. En se plaçant à l'Etat Limite de Décompression de la surface, en supprimant le facteur partiel de sécurité de 2 prenant en compte la fissuration sous-critique, la structure ne devra pas supporter un charge supérieure à $80/3.5 = 22.9$ kN. La figure ci-dessous présente alors les images photoélastiques simulées correspondant à :

- à la charge de décompression de la surface (80 kN);
- à la charge de décompression de la surface divisée par un coefficient partiel de sécurité de 3.5 (23 kN).

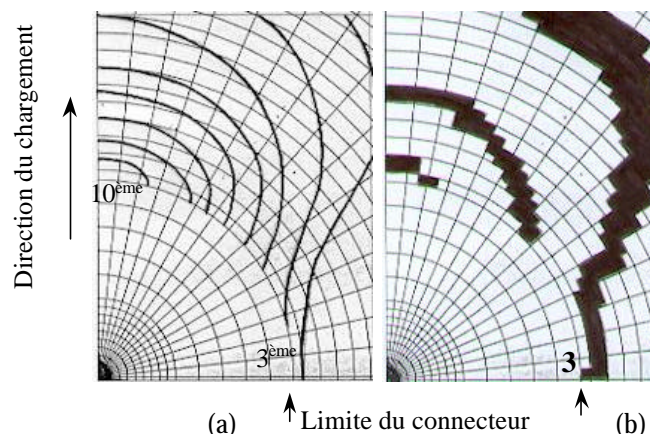


Figure 8. Différentes images photoélastiques de la plaque de verre au dessus du connecteur, obtenues par simulation pour une force de 80 kN (a), 23 kN (b)

5. Conclusion

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, l'utilisation de la photoélasticité est proposée pour le contrôle in situ des structures existantes. En effet, la simulation des images photoélastiques permettrait de relier état de contraintes et franges photoélastiques. Cet article se divise donc en deux principales parties. Dans un premier temps une méthode est proposée pour l'analyse photoélastique. L'originalité du 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 écrit 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. Ensuite, dans un second temps, la simulation de la trempe thermique d'une plaque de verre dans le but de calculer les contraintes résiduelles (et donc l'état de contrainte à ne pas dépasser en service) est présentée

L'article se termine par une application, en présentant deux états de contrainte caractéristiques critiques sur structures et les images photoélastiques correspondantes. Ce travail devrait pouvoir faire évoluer les méthodes de dimensionnement actuelles : suppression du facteur partiel de sécurité égal à 2

prenant en compte la fissuration sous-critique, voire également suppression des essais en vraie grandeur.

6. Bibliographie

- [ABE 83] ABEN H., GUILLEMET C., *Photoelasticity of Glass*, Berlin, Springer-Verlag, 1993.
- [ABE 00] ABEN H., AINOLA L., ANTON J., « Integrated photoelasticity for nondestructive residual stress measurement in glass », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 33, 2000, p.49-64.
- [AVR 84] AVRIL J., *Encyclopédie d'analyse des contraintes*, Paris Malakoff, Vishay Micromesures, 1984.
- [BAN 90] BANNER D., KLARSFELD S., *Influence of composition upon the apparent conductivity and emissivity of glass as a function of thickness and temperature*, Thermal conductivity 21, edited by Cremers and Fine, New York, Plenum Press, 1990.
- [BER 01] BERNARD F., « Sur le dimensionnement des structures en verre trempé : étude des zones de connexion », Thèse de doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2001.
- [BER 02a] BERNARD F., GY R., DAUDEVILLE L., « Finite element computation of residual stresses near holes in tempered glass plates », *Glass Technology*, vol. 43C, 2002, p. 290-295.
- [BER 02b] BERNARD F., DAUDEVILLE L. & GY R , « Sur le dimensionnement des structures en verre trempé », *Revue Française de Génie Civil*, vol 6, n° 7-8, 2002, p. 1359-1380.
- [BER 04a] BERNARD F., DAUDEVILLE L. & GY R., « Vers une procédure de contrôle des structures en verre trempé », *Mécanique et Industries*, vol. 5, n°3, 2004, p.267-273.
- [BER 04b] BERNARD F., DAUDEVILLE L. & GY R., « Load bearing capacity of connections in tempered glass structures », *Structural Engineering International*, vol. 14, n°2, 2004, p. 107-110.
- [BER 05] BERNARD F., DAUDEVILLE L. & GY R., « Calcul des contraintes résiduelles dans les zones d'assemblage de plaque en verre trempé », *Mécanique et Industries*, vol. 6, n°1, 2005, p. 55-64.
- [CAR 99] CARRÉ H., DAUDEVILLE L., « Load bearing capacity of tempered structural glass », *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, vol. 125, n°8, 1999, p. 914-921.
- [GUI 62] GUILLEMET C., ACLOQUE P., « New optical methods for the determination of the stresses near the surfaces », *Revue Française de Mécanique*, n°4, 1962, p. 157-163.
- [GY 94] GY R., DUFFRENE L., LABROT M., « New insights into the viscoelasticity of glass », *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol.175, 1994, p. 103-117.

- [LAU 99] LAUFS W., SEDLACEK G., « Stress distribution in thermally tempered glass panes near the edges, corners and holes, Part 2 : temperature distributions during the tempering process of glass panes », *Glass Science and Technology*, vol.72, n°1,1999.
- [MIC 83] MICHALSKE T.A., FREIMAN S.W., « A molecular mechanism for stress corrosion in vitreous silica », *J. Am. Ceramic Society*, vol. 66, n°4, 1983, 284-288.
- [NAR 71] NARAYANASWAMY O.S., « A model of structural relaxation in Glass », *Journal of American Ceramic Society*, vol.54, n°10, 1971, p. 491-498.
- [TOO 46] TOOL A.Q., « Relation between inelastic deformability and thermal expansion of glass in its annealing range », *Journal of the American Ceramic Society*, vol.29, n°9, 1946, p.240-253.