

Mesure du champ de déplacement transverse par voie optique appliquée au thermoformage du verre

L. SOUDRE (1,2) , F. ASLLANAJ(1), Y. MESHAKA(2) & G. JEANDEL(1)

(1) LEMTA-UHP BP 239 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy cedex
 (2) LSGS-INPL EEIGM 6 rue Bastien Lepage 54010 Nancy cedex
 laetitia.soudre@eeigm.inpl-nancy.fr

Résumé :

L'objectif de cette étude est de modéliser le comportement thermomécanique du verre au cours d'un procédé complet de thermoformage (montée en température, palier de travail, refroidissement). Le verre étant absorbant, émissif et non-diffusant, la prise en compte du rayonnement dans la modélisation du transfert de chaleur s'avère être indispensable. Après avoir présenté la problématique associée à ce projet, nous décrirons le banc expérimental développé au sein du laboratoire ; il devrait permettre de valider expérimentalement les résultats numériques issus de notre modélisation. Ce banc se compose d'un four de thermoformage adapté et couplé à un système optique de mesures de champ de déplacement et de température de la surface supérieure de la plaque de verre. Le dispositif et la méthode employés pour mesurer le déplacement, basés sur l'utilisation de la lumière structurée, seront au centre de cette présentation.

Abstract :

This study aims at modelling and simulating the mechanical and thermal behaviour of glass during a complete forming process (heating, shaping at high temperature, cooling). Glass is a non-grey purely absorbing material, thus a thermal model has to take in account radiative transfer. We first introduce the conceptual issue of the study, then we describe the experimental apparatus developed within our research laboratory. This apparatus should allow us to validate experimentally the digital results acquired through our modelling. It consists of a fusing furnace coupled with devices to measure temperature and displacement fields on the glass surface. We focus here on the description of the optical system for measuring transverse displacement using structured light.

Mots-clefs :

mesures sans contact, couplage thermomécanique, thermoformage du verre

1 Présentation générale

L'objectif final est de modéliser un cycle complet de thermoformage d'une plaque de verre. Le thermoformage consiste à placer cette plaque sur un moule, dans un four spécifique afin d'élever sa température jusqu'à 750°C environ. À cette température, le verre flue sous l'action de son propre poids, se déformant jusqu'à l'obtention de la forme souhaitée. Cette étude veut répondre à des difficultés technologiques rencontrées par les artisans et rapportées par le CERFAV (Centre Européen de Recherche et de Formation aux Arts Verriers). Le thermoformage du verre reste essentiellement basé sur l'empirisme et soulève d'importants problèmes de reproductibilité, d'uniformité de l'épaisseur finale, d'empreintes laissées par le moule,...

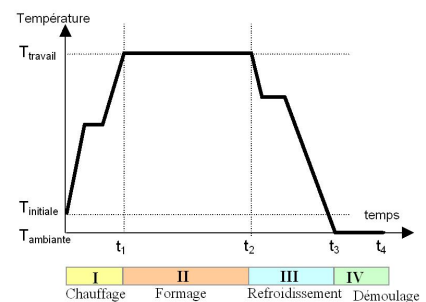


FIG. 1 – Chargement thermique d'un cycle de thermoformage

Matériau amorphe, le verre est caractérisé par la forte thermodépendance de ses propriétés mécaniques et de son comportement qui est :

- élastique, à température ambiante : caractérisé par sa déformation réversible et son caractère fragile et ductile,
- viscoélastique, dans le domaine des températures intermédiaires autour de la température de transition vitreuse (T_g) : avec un comportement complexe dépendant notamment de la vitesse de déformation,
- liquide ou visqueux au-delà de T_g .

Compte-tenu du chargement thermique (fig.1) auquel la plaque de verre est soumise dans le four, le modèle mécanique développé dans cette étude doit être suffisamment complet pour décrire ces trois comportements caractéristiques et prendre en compte la dilatation thermique du verre. L'objectif est de pouvoir connaître la position de tous les points de la plaque en fonction du temps tout au long du procédé mais aussi de déterminer les contraintes résiduelles induites au sein de la structure par la phase de refroidissement.

Parallèlement, il est nécessaire de connaître, en fonction du temps et en tout point du matériau qui se déforme, la température « vraie », paramètre clef du modèle mécanique. Elle diffère de la température à l'intérieur du four puisque le verre est un matériau non gris et semi-transparent (absorbant, émissif et non-diffusant) pour lequel la prise en compte du rayonnement s'avère indispensable. De précédentes études (Berour *et al.*, 2006) ont montré que la part de rayonnement sur le comportement thermique global du verre peut atteindre 50% pour certaines températures et longueurs d'onde. Un modèle thermique couplant l'Équation du Transfert Radiatif (ETR) et l'équation de la chaleur est donc utilisé pour déterminer cette température. Une difficulté s'ajoute à la résolution de l'ETR : elle est liée à la géométrie de la pièce qui évolue au cours du temps. La modélisation du procédé de thermoformage ne peut donc se faire qu'au travers d'un couplage fort entre la mécanique et la thermique.

La conduction et le modèle mécanique sont intégrés au sein du logiciel commercial d'éléments finis MSC MARC© au travers de procédures utilisateur. L'ETR est résolue par un code de volumes finis développé par Asllanaj *et al.* (2007). La simulation d'un cycle complet de thermoformage nécessite le couplage et la mise en parallèle de ces deux codes.

Enfin un banc expérimental a été développé pour répondre au besoin de validation de la simulation numérique basée sur les modèles thermomécaniques mis en place. Le four de thermoformage doit être instrumenté pour permettre les mesures de champs de température et de déplacement de la plaque. Cependant l'instrumentation doit être réalisée sans modification majeure du procédé afin de rester le plus conforme possible à la réalité artisanale. Nous présentons dans cet article le montage expérimental et les outils de mesure spécifiques mis en place en complément de la simulation du procédé.

2 Étude expérimentale

La problématique expérimentale est donc la suivante : mesurer de manière non destructive les champs de température et de déplacement de la face supérieure d'une plaque de verre tout au long du chargement thermique (fig.1) au sein d'un four de thermoformage qui est une enceinte close.

2.1 Les exigences

La température élevée à l'intérieur du four impose de placer les capteurs à l'extérieur de ce dernier, les mesures se font donc sans contact par voie optique. Il est alors nécessaire de créer

des ouvertures dans le four pour permettre une bonne visibilité tout en minimisant les pertes thermiques et l'atténuation du signal. L'émission propre du verre et de l'environnement influent sur les signaux optiques mesurés, de plus la chaleur dégagée par le procédé peut endommager les instruments de mesure. Différents filtres optiques ont donc été prévus ainsi qu'un système de refroidissement placé sur le four.

2.2 Le four

Il s'agit d'un four cloche électrique qui chauffe par rayonnement grâce à six résistances placées parallèlement à 6cm l'une de l'autre sur la paroi supérieure du four (la voûte). Il s'ouvre par le haut (fig.2) et est posé sur un support métallique. Le socle (sole) mesure $500 \times 500 \text{mm}^2$. La hauteur a été modifiée, en accord avec le constructeur, pour atteindre une hauteur utile sole-résistances de 450mm (ce qui permet d'augmenter le champ de mesure) et la puissance électrique a été portée à 6kW. Il est livré avec un régulateur PID par zone de telle sorte que les résistances de part et d'autre des ouvertures sont commandées simultanément afin de compenser les éventuelles pertes thermiques.



FIG. 2 – Le four

Il est constitué de fibre hydrosoluble, matériau réfractaire normalisé et la carcasse est en tôle. Pour permettre les mesures optiques, la cloche a été percée sur toute l'épaisseur de la voûte (capot en tôle et réfractaire) sur un diamètre de 101mm pour permettre un champ de mesure de 130mm, (fig.4, distance **d**).

Les trois perçages permettant les mesures sont « comblés » pour éviter l'effet de cheminée qui pourrait apparaître par convection. Il a donc fallu mettre au point un système de hublot compatible mécaniquement et thermiquement avec la fibre réfractaire et atténuant le moins possible le signal optique mesuré. De plus ils doivent converger vers la même zone afin d'obtenir les informations sur les mêmes champs géométriques.

2.3 Les hublots/fenêtres de mesure

Le matériau qui les constitue, la Monalite 1A, est constitué de silicate de calcium et appartient à la famille des céramiques techniques. Il est compatible mécaniquement et thermiquement avec la fibre hydrosoluble et présente un faible coefficient de dilatation ($6,2 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$), une bonne résistance mécanique, une faible conductivité et il est facilement usinable.

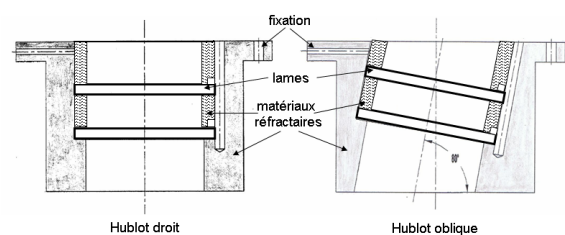


FIG. 3 – Schéma des hublots

Des lames transparentes aux longueurs d'onde mesurées sont placées dans la pièce pour former un multiple vitrage. La difficulté technique réside dans la conception du système. Il doit être facile à mettre en place et à démonter, suffisamment maintenu pour ne pas sortir à l'ouverture (le four s'ouvrant par le haut), les lames doivent pouvoir être changées et le tout doit tenir à la température et ne pas trop atténuer le signal. La solution technique choisie est présentée sur la figure 3 ; les lames seront décrites ultérieurement.

2.4 Le système de mesure de température sans contact

Afin d'effectuer cette mesure, nous captions le flux radiatif pour le convertir en une mesure de température. Les propriétés radiatives du verre, et principalement l'émission, dépendent de la longueur d'onde et de la température. Le verre présente de plus la propriété de se comporter comme un corps noir, *i.e.* d'avoir un coefficient d'émission égal à 1 pour une longueur d'onde particulière : la longueur d'onde de Christiansen. Ainsi à cette longueur d'onde la température est liée au flux monochromatique radiatif par la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma \approx 5,67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$) et la relation : $Q_{rad,\lambda} = \sigma T^4$. Un filtre nous permet d'isoler le flux radiatif correspondant à cette longueur d'onde, et une thermopile convertit ce flux en tension. En parallèle, la mesure de champ est effectuée au moyen d'une caméra infra-rouge qui utilise l'émission moyenne sur toute sa gamme de longueur d'onde permettant une cartographie très précise des écarts de température sur la face supérieure de la plaque mais elle reste entachée d'une imprécision sur la température absolue en un point. Celle-ci est corrigée par calibrage grâce à la mesure précise et ponctuelle de la température obtenue simultanément avec le pyromètre de Christiansen.

3 Mesure du déplacement transverse

Le système retenu dans cette étude est fourni par le CRITT HOLO3 (*cf.* Chalvidan *et al.* (2001)); sa mise en oeuvre à haute température constitue une innovation certaine de par les contraintes imposées par le procédé.

3.1 Le principe

La mesure du déplacement transverse est réalisée de manière indirecte grâce à l'utilisation des propriétés de la lumière structurée. Un réseau optique composé de lignes parallèles est projeté sur l'objet étudié. Lorsque celui-ci se déforme il induit une déformation du réseau. L'information mesurée est alors comparée de manière numérique à la référence projetée et on calcule le déphasage entre les deux signaux. Pour quantifier ce déphasage, deux méthodes peuvent être mises en place : l'étude des variations de fréquences des deux signaux l'un par rapport à l'autre (qui emploie les Transformées de Fourier) et le décalage de phase.

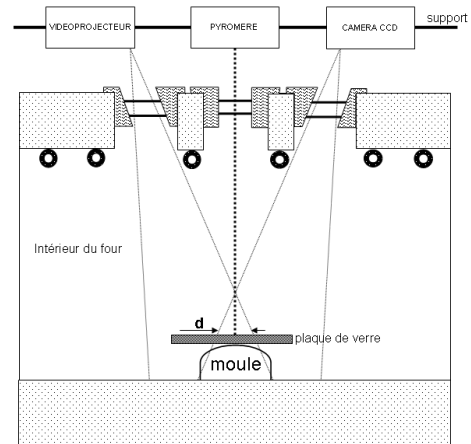


FIG. 4 – Système de mesure mécanique

Le système se décompose en deux parties, un vidéoprojecteur et une caméra CCD (fig.4) reliés à un ordinateur pour l'acquisition et le traitement du signal. Ceux-ci sont placés au-dessus du four sur un support spécifique permettant l'ouverture de la cloche du four tout en garantissant un repositionnement très précis (à 10^{-2} mm près) de chaque instrument au-dessus de son hublot. Le vidéoprojecteur forme l'image d'un réseau optique sur la plaque de verre étudiée. Cette image doit se réfléchir sur le verre pour être captée par la caméra CCD. Il est donc nécessaire que la surface soit diffusante pour permettre la réflexion du signal vers le capteur CCD de la caméra, en conservant le contraste du réseau. Pour s'assurer de la bonne diffusion du motif projeté sur la zone mesurée, un dépôt blanc est réalisé grâce à un aérosol de poudre blanche dans un support alcool isopropylique.

Les deux hublots utilisés sont symétriques et obliques (fig.4) ; pour atténuer le moins possible le signal optique, ils sont fermés par des lames de silice. Celle-ci présente le double avantage d'être transparente dans le visible et de tenir à haute température. Les signaux optiques mesurés appartiennent aux longueurs d'ondes visibles (350-750nm) ; le rayonnement des résistances, du verre, et du four commençant dans le rouge, il est coupé à partir de 600nm par un filtre passe-bas. L'atténuation du signal qui en résulte est en partie compensée par la sensibilité maximum du capteur CCD dans le bleu et vert (entre 350 et 450nm). Ces filtres ainsi qu'un ventilateur (ou serpentin à circulation d'eau selon la température de travail) protègent les capteurs de la chaleur dissipée par rayonnement et convection par le four.

3.2 La mesure

La méthode choisie est le décalage de phase pour sa précision et sa simplicité de mise en oeuvre ; par contre elle présente l'inconvénient de nécessiter un temps d'acquisition de 2 images/s (plus long que la méthode de variation de fréquence). En effet, elle utilise plusieurs réseaux différents, chacun décalé quatre fois lors de la projection.

On projette un réseau sinusoïdal. L'intensité lumineuse, mesurée par le capteur CCD en chaque point de l'objet (pixel) de coordonnées (x, y) , est elle aussi sinusoïdale et s'écrit :

$$I(x, y) = I_0(x, y) (1 + m(x, y) \cos(\phi(x, y)))$$

Les trois inconnues sont I_0 l'intensité moyenne, m le contraste des franges (qui dépend tous deux du système de projection et du matériau observé) et ϕ la phase. Celle-ci dépend de $z(x, y)$ car le chemin optique parcouru par le rayon réfléchi dépend directement de z et nous donne une mesure relative du déplacement, la phase n'étant connue qu'à $[2\pi]$ près. On obtient les relations suivantes :

$$\Delta\phi(x, y) = \frac{2\pi}{T}\Delta X = \frac{2\pi}{p} \cos\theta \Delta X$$

avec p , la période du réseau projeté et T , celle du réseau observé. En projetant selon θ on obtient :

$$\Delta Z(x, y) = \frac{\Delta X}{\tan\theta} = \frac{p}{2\pi \sin\theta} \Delta\phi(x, y)$$

On réalise une mesure de forme à chaque acquisition

ou « instant » ; celle-ci nous donne les trois coordonnées de chaque point de la plaque vu par le capteur CCD et on peut, par comparaison d'une forme à l'autre, déduire le déplacement transverse en z en supposant que les déplacements dans le plan (x, y) sont négligeables. Cette relation permet de relier le déplacement d'un point à la phase mesurée. Pour déterminer cette dernière, il faut résoudre la première équation qui comporte trois inconnues, nous allons donc créer un système de trois équations par l'introduction d'un déphasage connu (ϕ_i , $i = 1, n$ et $n \geq 3$) dans chaque réseau : $I_i(x, y) = I_0(x, y)(1 + m(x, y) \cos(\phi(x, y) + \phi_i))$

Pour calculer ϕ , plusieurs algorithmes existent et le nombre n de décalages peut varier. Notre mesure est basée sur quatre décalages qui constituent un bon compromis entre le temps d'acquisition et la précision de la mesure.

On obtient alors la relation : $\phi(x, y) = \arctan \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_3(x, y) - I_1(x, y)}$

Les propriétés de la fonction arctan sont telles que la phase, définie ci-dessus, est calculée à $[2\pi]$ près. Une étape de démodulation est alors employée ; elle permet de s'affranchir des discontinuités de phases et donc d'accéder à la phase unique. On projette successivement des

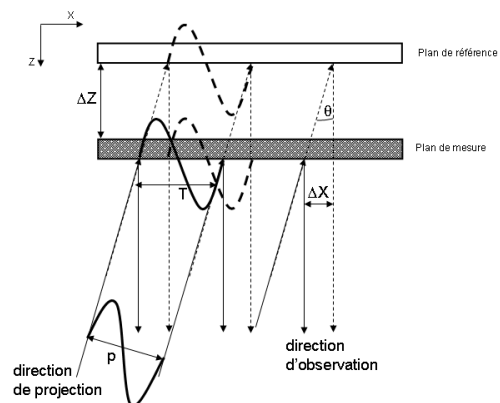


FIG. 5 – Relation entre la phase ϕ et le déplacement en z

réseaux avec des périodes de plus en plus faibles (réseaux de plus en plus serrés) et on détermine la phase pour chacun d'eux selon le principe énoncé précédemment. Le premier réseau, le plus large, s'étend de 0 à 2π sur tout le champ projeté. Ensuite, on projette un réseau deux fois plus petit, qui présente alors un saut de phase au milieu du champ. Les sauts de phases qui sont parfaitement connus permettent, en comparant les phases mesurées pour chaque réseau projeté, d'accéder à la phase unique après la dernière projection.

3.3 Le calibrage

La comparaison d'un instant à l'autre des coordonnées z de la forme, pour un couple (x, y) nous donne le déplacement transverse. Ce traitement est réalisé sous un logiciel dédié mais la méthode décrite ci-dessus nécessite au préalable un étalonnage. Le calibrage est réalisé en déplaçant une mire en trois positions connues (à 10^{-2} mm près) sur toute l'amplitude verticale de mesure (position minimum, maximum et une position intermédiaire) à différentes températures au cours du procédé. Le matériau constituant la mire (fig.6) doit tenir en température, avec un coefficient de dilatation très faible pour ne pas entâcher les mesures d'erreur intrinsèque. Deux solutions techniques sont envisageables : l'alumine et le silicate de calcium qui sont tous deux des céramiques frittées à une base claire ; un ciment (ou adhésif céramique) à base de graphite venant combler les motifs usinés dans la céramique et créer le contraste nécessaire à la mesure. Le silicate de calcium étant peu onéreux, léger, facilement usinable mais poreux et plutôt beige ; l'alumine étant dense, très blanche, mais coûteuse et nécessitant un usinage diamant. Une phase de prototypage est en cours de réalisation pour choisir le matériau composant la mire définitive.

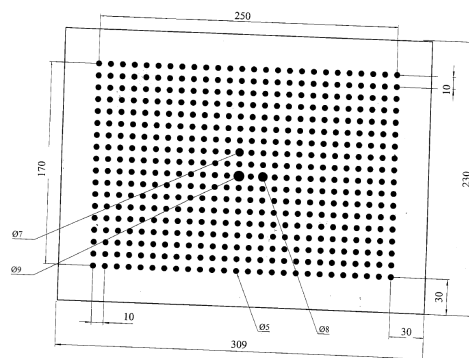


FIG. 6 – Schéma de la mire

4 Conclusion

Nous avons donc réussi à développer un banc expérimental conforme à la réalité artisanale du procédé de thermoformage et permettant des mesures, non destructives ni intrusives, portant sur la surface supérieure du verre, de champs temporels en température et déplacement. La problématique de la mesure des déplacements transverses était liée à : la mesure dans un four fermé, la température élevée de travail et la transparence du matériau dans le visible. À terme, la comparaison des champs de température et de déplacement expérimentaux du verre avec les résultats numériques issus de notre modèle thermomécanique devrait permettre d'apporter une première validation à notre étude.

Références

- Chalvidan, V., Chambard, J-P., Mecuson, G., Ayadi, Z., Nivoit, M. 2001 Mesure de déformations par voie optique *XVème Congrès Français de Mécanique, Nancy 2-7 septembre 2001*
- Berour, N., Lacroix, D., Jeandel, G. 2006 Radiative and conductive heat exchanges in high-temperature glass melt with the finite-volume method approach. *Numerical Heat Transfer, Part A* **49** (6) 567-588
- Asllanaj, F., Feldheim, V., Lybaert, P. 2007 Solution of radiative heat transfer in 2-D geometries by a modified finite volume method based on a cell vertex scheme using unstructured triangular meshes *Numerical Heat Transfer, Part B* **51** (2) 97-119