

# Du numérique pour nos verres ? Numerical procedures for our glasses ?

**D. LOCHEGNIES**

*Université de Valenciennes - L.A.M.I.H.*

This paper presents the main steps of the method used for integrating numerical tools in the design and optimization of glass forming or tempering: definition of a numerical model, identification of parameters (mechanical and thermal properties), optimization of industrial forming or tempering process.



## 1. Quel est le contexte industriel ?

Lors de la fabrication d'un produit en verre, plusieurs questions se posent au fabricant verrier, producteur de verre creux ou de verre plat :

- quel procédé vais-je utiliser ?
- quelles géométries pour mes outils ?

- quels paramètres pour mon procédé ?

Plus généralement :

- que se passe-t-il vraiment lors de la fabrication ?
- pourquoi y-a-t-il eu ce problème ?
- suis-je limité par mon outil actuel de fabrication ?

Est ce que cette nouvelle méthode de formage est envisageable ?

Que ce soit dans le domaine du formage ou de la trempe du verre, aujourd'hui, répondre à l'ensemble de ces questions par le biais de moyens d'essais expérimentaux, est une solution longue et coûteuse, qui ne répond plus aux exigences des délais de fabrication. L'intégration des moyens numériques est une solution efficace adoptée depuis quelques années par les grands groupes verriers pour apporter des solutions aux questions précédentes [1].

## 2. Quels outils numériques ?



Les outils numériques de simulation du formage ou de la trempe du verre doivent intégrer les phénomènes liés à la thermique, aux déformations et aux contraintes dans le verre lors de l'opération. Ils peuvent être sommairement classés en 2 catégories :

- «simples» ou de pré-analyse : ils sont essentiellement basés sur des hypothèses simplificatrices sur la géométrie, l'écoulement de verre, l'évolution des grandeurs mécaniques et thermiques... Ils privilégient l'analyse dans un système à 1 ou 2 dimensions ; de la sorte, les données introduites sont limitées, la mise en œuvre simplifiée et les temps de calcul réduits.
- «complexes» ou d'analyse : ces outils sont les plus performants en matière de compréhension des phénomènes mis en jeu avec, en général, une approche tridimensionnelle du problème à analyser. Ils ont pour objectifs de simuler la réalité industrielle dans toute sa complexité. Bien entendu, la base de données à intégrer est plus étendue et nécessite le recours à des essais de caractérisation appropriés. La mise en œuvre est l'affaire de spécialistes et les moyens de calculs sont conséquents. Pour réussir l'intégration de tels outils dans l'optimisation et la conception des procédés industriels, plusieurs étapes essentielles sont à mettre en place :

1- Définir un modèle numérique du procédé industriel adapté à l'objectif recherché et représentatif de la situation réelle. Dans ce sens, il est impératif de s'assurer que la réponse du modèle numérique à une perturbation d'une donnée d'entrée est similaire à la réaction réelle du procédé. Par exemple, si une diminution de temps de fluage a pour effet de diminuer la répartition de verre dans le bas du produit, la simulation numérique doit mettre en évidence cette même corrélation.



Une fois le modèle numérique développé, une analyse de sensibilité va permettre de déterminer d'abord l'influence respective des données d'entrée sur le résultat du procédé en formage ou en trempe ; ensuite, elle conduira à une sélection des données d'entrée les plus influentes qui rassemblent à la fois, des propriétés thermiques à déterminer (viscosité, conduction thermique, résistance de contact...) et des paramètres du procédé à optimiser (temps de fluage, géométrie d'outils, pression de soufflage....) [2].

2- Procéder à l'identification des données d'entrée influentes qui concernent les propriétés mécaniques et thermiques. Pour cela, des tests appropriés doivent être effectués, en laboratoire ou mieux encore en situation industrielle.

3- La dernière étape concerne l'optimisation du procédé de formage ou de trempe et la recherche de la solution technologique. Là, ce sont les paramètres optimaux du procédé qui sont recherchés comme la géométrie d'un moule ébaucheur, la cartographie thermique d'un pare-brise avant formage, la position des jets d'air dans l'unité de trempe...

De manière à rendre plus efficace la recherche de propriétés ou de paramètres du procédé via les modèles numériques, des techniques d'optimisation ont été plus récemment apportées dans ce contexte de simulation numérique. De manière synthétique, la formulation mathématique peut se résumer par la formule suivante :

$$E(p_1, p_2, p_3, \dots) = \sqrt{\frac{1}{M} [\text{Objectif} - \text{Numérique}(p_1, p_2, p_3 \dots)]^2}$$

M points

En identification de propriétés mécaniques et thermiques, l'objectif représente l'information fournie par le test d'identification comme l'évolution de température dans le verre ou un allongement de la paraison sur une période donnée... C'est sous la dénomination numérique que cette même information est donnée par le modèle numérique. En optimisation de procédé, l'objectif décrit typiquement le produit final à atteindre par le fabricant, comme la répartition de verre dans l'article, la géométrie finale du pare-brise...

Dans les 2 cas, M points (différents temps, différentes positions dans le produit...) vont être utilisés pour comparer les 2 réponses sous la forme d'un écart E fonction des inconnues  $p_1, p_2, p_3 \dots$  qui représentent les données d'entrée du modèle numérique à identifier ou à optimiser.

Pour réduire l'écart E, des techniques d'optimisation sont mises en œuvre. Elles vont permettre de corriger automatiquement le jeu de données initiales  $p_1, p_2, p_3 \dots$  (en optimisation de procédé, c'est l'expérience du fabricant qui fournira ce jeu initial) aux moyens d'algorithmes mathématiques [3] par itérations successives.

Les exemples suivants illustrent l'application de ces méthodes en identification et en optimisation de procédés industriels.



Figure 1

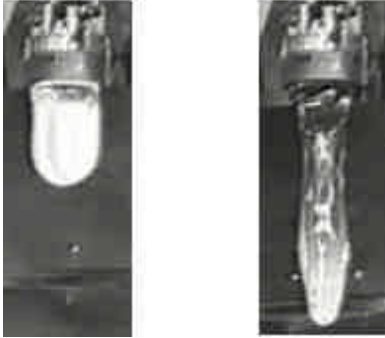


figure 2

### 3. Identification de propriétés

Lors du test industriel (figure 1), l'enregistrement de la température du verre est faite par pyromètre. Le modèle numérique est purement thermique. Les inconnues à rechercher sont ici la température initiale du verre et l'échange avec l'air ambiant [4].

Sur les figures 2, c'est l'allongement du verre qui a été enregistré et le modèle numérique intègre les aspects thermiques et mécaniques liés à l'écoulement de verre. L'inconnue est ici la viscosité du verre fonction de la température [4].

### 4. Optimisation de formages industriels

Dans ce contexte, les outils numériques présentés ici sont complexes et intègrent la tridimensionnalité du procédé industriel à optimiser, les aspects mécaniques et thermiques influant sur l'écoulement du verre. L'étude (figure 3) a pour objectif de recherche la forme optimale de la paraison en vue de réaliser après allongement sous poids propre et soufflage interne, le produit de révolution qui possède une géométrie et une répartition de verre

atypique. Les inconnues de la modélisation sont l'équation mathématique de la paraison et ses paramètres qui serviront ensuite à concevoir le moule ébaucheur.

Dans les 2 cas suivants (figure 4), l'objectif est dans le premier exemple de trouver le refroidissement à prévoir dans les outils de pressage de façon à respecter les cadences de production. Les inconnues ici sont les propriétés de convection de l'échange thermique dans les outils pour produire à la surface du verre les températures adéquates pour un démoulage à la cadence industrielle. Dans le second exemple, il s'agit de fabriquer une lentille optique progressive par affaissement sous poids propre sur un poinçon. Le



Figure 3



figure 4

caractère progressif de la lentille est liée à la surface externe qui doit respecter l'équation mathématique fournie par des études d'optique. L'objectif ici est de déterminer la forme optimale du poinçon pour produire cet effet.

D'autres exemples en formage de verre creux par soufflage, pressage, centrifugation, de verre plat par pressage, fluage sont fournis dans les références [4, 5, 6].

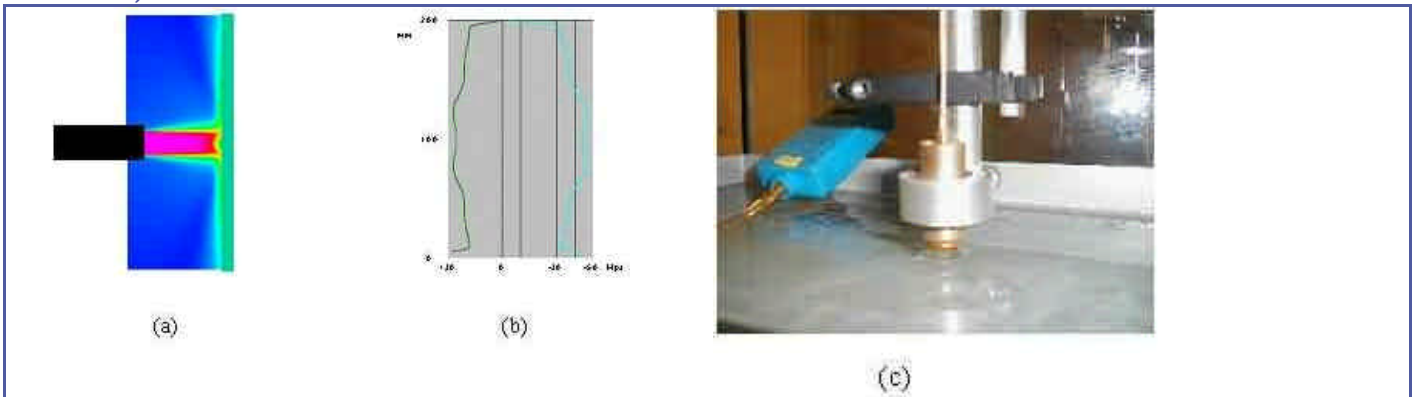
### 5. Optimisation de trempes industrielles

La simulation numérique d'une trempe industrielle est plus complexe. En effet, elle doit d'abord pouvoir quantifier l'échange thermique imposé par les jets d'air positionnés autour du produit à tremper. Les outils numériques sont ceux de la Mécanique des Fluides et modélisent l'écoulement de l'air (figure 5a). Ensuite, il est nécessaire de répercuter l'effet de ce refroidissement sur les phénomènes de relaxation (de la structure et des contraintes) liés au comportement viscoélastique du verre. Ici, ce sont les outils du Calcul des Structures qui sont à mettre en œuvre pour estimer les contraintes de trempe (figure 5b).

Pour concevoir l'installation, les techniques précédentes d'optimisation sont à mettre en œuvre mais un point délicat concerne la définition de l'objectif à atteindre. Dans le cas des

produits plats, il peut s'exprimer simplement par une contrainte de surface de traction imposée en des points précis du produit en verre. Ces contraintes de surface sont accessibles par les moyens actuels de mesures.

Dans le cas des produits volumiques, il est plus difficile de définir l'objectif par une méconnaissance des répartitions des contraintes réelles ; la cause est la difficulté expérimentale d'accéder à cette information dans des produits présentant des géométries complexes et des répartitions de verre non uniformes. Des recherches en cours [2, 7] tentent d'apporter des éléments de réponse par le biais de techniques ultrasonores (figure 5c).



## 6. Conclusions

L'intégration des moyens de simulation numérique constitue aujourd'hui, de toute évidence, une aide essentielle dans la conception et la conduite des unités de formage et de trempe de verre.

Elle conduit le fabricant verrier vers une meilleure compréhension des phénomènes thermiques et mécaniques inhérents au produit et au procédé. Au fur et à mesure, l'empirisme fait place à une rationalisation des savoir-faire.

Ces outils informatiques autorisent, à moindre coût et des temps d'études réduits, l'essai de différentes solutions technologiques virtuelles et la sélection de la solution optimale qui sera, dès lors, mise en œuvre réellement.

Par la-même, avec une réduction des délais de conception et de mise au point, une répercussion sur le coût et la qualité du produit final est visible et garantit une compétitivité durable.

Bien entendu, si ces outils numériques apportent une aide indéniable, l'être humain avec ses idées innovantes et tout son savoir-faire de l'unité de production demeure un des piliers du progrès technologique futur.

Le second colloque international organisé par l'équipe Modelling of Glass Forming Processes rassemblera autour de ces sujets les spécialistes des centres de recherches verriers industriels et académiques et les professionnels verriers en formage et en trempe du 23 au 25 Janvier 2002 à Valenciennes – France.

Toutes les informations sont disponibles sur le site : [www.univ-valenciennes.fr/LAMIH/LGM/MGFT2002.htm](http://www.univ-valenciennes.fr/LAMIH/LGM/MGFT2002.htm)

## Références

[1] LOCHEGNIES, D., OUDIN, J., Fully integrated finite element models in the design and the manufacture of glass products, In P. Chedmail, J.C. Bocquet & D. Dornfeld (Eds.), *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, p. 153-162. *Dordrecht. Kluwer Academic Publishers*, ISBN : 057923-4739-0, (1997)

[2] LOCHEGNIES, D., WIERTEL, P., NARAYANASWAMY, O.S., Inverse determination of material properties and optimization of flat glass tempering, In D. Locheignies & R.M.M. Mattheij (G.Eds), *Modelling of Glass Forming and Tempering*, (p. 95-116), Paris, Hermes Science Publications, ISBN : 2-7462-0081-3, (1999)

- [3] MOREAU, P., LOCHEGNIES, D., OUDIN, J., Aide à la conception des outils en pressage de verre plat, *Verre*, 4,(1998), p. 9-13
- [4] MARÉCHAL, C., LOCHEGNIES, D., OUDIN, J., Numerical optimization of a new robotized glass blowing, In Helebrant, A., Maryska, M., & Kasa, S. (Eds), *5th ESG Conference on Glass Science and Technology for the 21st Century*, (p. 44-50), Prague, (1999)
- [5] MOREAU, P., LOCHEGNIES, D., OUDIN, J., An inverse method for prediction of the required temperature distribution in the creep forming process. *Proc Instn Mech Engrs, Journal of Mechanical Engineering Science*, 212(1998b), p. 7-11
- [6] NOIRET, C., LAURO, F., LOCHEGNIES, D., OUDIN, J., An inverse method for determining forming parameters of hollow glass items. In J.L. Chenot, J.F. Agassant, P. Montmittonet, B. Vergnes and N. Billon (Eds), *Proceedings of the First ESAFORM Conference on Material Forming*, (p. 437-440), Sophia-Antipolis, (1998)
- [7] LOCHEGNIES, D., ROMÉRO, E., LERICHE, A., DUQUENNOY, M., MONNOYER, F., Numerical modelling, experimental investigation, stress control for flat glass tempering, In De Waal, H., Beerkens, R.G.C., Peelen, J., & Van de Woude, J.H.A. (Eds), *I.C.G. Annual Meeting , Glass in the New Millenium : Challenges and Break-Through Technologies*, Session T1 (p. 1-8), Amsterdam, (2000)

Source : **Revue VERRE** – Vol 6, n°6. Décembre 2000  
© Institut du Verre – <http://www.institutduverre.fr>