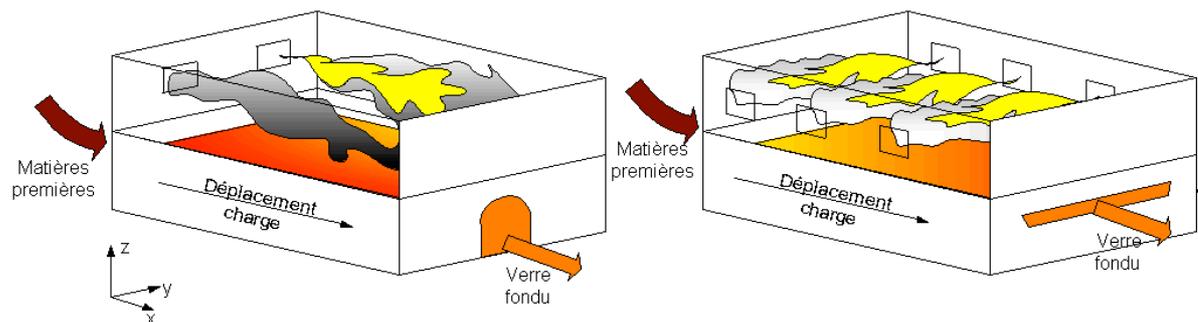


## ***Les fours verriers industriels, nécessité de modèles fins et de modèles rapides***

*Olivier Auchet (Ensem, Nancy)*

- 1) **Les fours verriers industriels :** Le matériau verre doit son succès d'une part à ses propriétés optiques, mécaniques et chimiques très intéressantes pour la multitude d'applications que l'on connaît. D'autre part, à la relative simplicité de son procédé de production industrielle. Après des millénaires d'artisanat et la révolution industrielle, on est parvenu à produire du verre en grande quantité grâce aux fours continus [1]. Ainsi, le procédé datant de l'antiquité qui consistait à faire fondre une quantité finie de matières premières dans un pot et à attendre qu'elle soit prête pour le formage a été abandonné au profit de la production continue dans des cuves réfractaires aux dimensions gigantesques. On y introduit les matières premières à une extrémité et on soutire le verre fondu à une autre extrémité (voir figure 1). Un système de chauffage (par flamme et/ou électrique) fournit l'énergie nécessaire à la fusion des matières premières et aux mécanismes de formation du verre qui se déroulent en continu dans le bassin de fusion. Les cadences de productions journalières par ce procédé ont atteint plusieurs centaines de tonnes de verre fondu qui est ensuite transformé en produits finis sur des lignes de formage entièrement mécanisées.



**Figure 1 :** *Fours à boucle et à brûleurs latéraux (à droite).  
Représentation de l'enceinte de combustion et du bassin de fusion*

Selon le type de production, la taille du bassin de fusion et le système de chauffage sont adaptés [2], [3]. Pour le verre plat par exemple, la qualité que l'on attend d'une vitre ou d'un pare-brise exige d'avoir du verre fondu très pur en sortie du four, et les mécanismes d'affinage (cf. section suivante, fig. 2) nécessitent du temps pour atteindre cette pureté. C'est pour cela que les fours *float* (ou à verre plat) ont un rapport longueur/largeur élevé en sorte ce que le temps de résidence du verre soit long dans le bassin de fusion. Le système de chauffe le plus adapté à cette géométrie en longueur est à brûleurs latéraux. Pour le verre creux, la géométrie est différente parce que les contraintes sur le verre sont différentes, et on trouve souvent des fours à boucle plus petits avec des flammes dans le même sens que l'écoulement de verre.

L'apparition des fours continus date du 19<sup>ème</sup> siècle. Depuis, et particulièrement durant ces dernières décennies, le coût énergétique de la production et l'impact des installations sur l'environnement ont toujours exigé une optimisation constante de la part des ingénieurs [4]. On a ainsi cherché à allonger la durée de vie des réfractaires des parois, de maximiser les transferts de chaleur vers le

bain, de minimiser l'émission de polluants, d'optimiser la qualité du verre. Pour cela, l'outil le plus adéquat est la modélisation, grâce à laquelle des solutions peuvent être testées sur un four virtuel. En fonction de l'application, le compromis précision/temps de calcul doit être optimisé, et il existe des modèles fins longs à simuler et des modèles moins précis rapides à simuler.

- 2) **Modèles fins de fours verrier :** Avant l'apparition des ordinateurs (i.e. de 1900 à 1980) et de leur puissance de calcul élevée, les modèles de four verriers étaient le plus souvent des maquettes réduites sur lesquelles on étudiait des comportements similaires à ceux des fours réels, grâce à des écoulements de glycérine ou d'huile dans lesquels on injectait des traceurs [5]. Quelques modèles mathématiques simples étaient également utilisés. L'ère de l'informatique a révolutionné le monde de la modélisation, et on a pu commencer (début des années 70) à écrire et résoudre les équations de la physique dans des modèles numériques, avec une flexibilité encore jamais rencontrée [6].

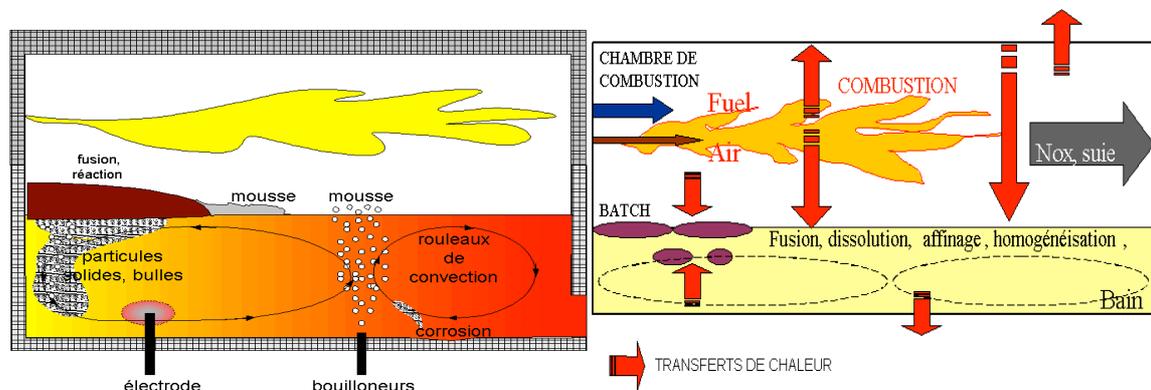


Fig. 2 : Phénomènes du four

Depuis, les modèles numériques ont complètement supplanté les modèles physiques et on est aujourd'hui en mesure de simuler en régime transitoire le fonctionnement du four, en prenant en compte des phénomènes très complexes (cf. fig. 2), [7]. Tous les grands verriers, ainsi que de nombreux instituts de recherche indépendants possèdent leur propre modèle, qui comportent plusieurs sous-modèles comme le montre le schéma suivant :

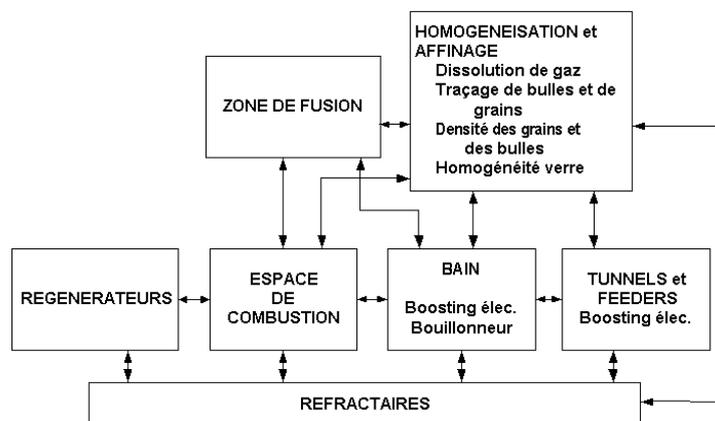


Fig. 3 : Structure des modèles complets de fours verriers, d'après [6]

Les principaux modèles sont les suivants :

- Dans la **chambre de combustion**, on est en présence d'un écoulement turbulent réactif à hautes températures avec flammes non pré-mélangées. Les modèles comportent un solveur hydrodynamique prenant en compte la turbulence par moyennisation des équations de Naviers-Stokes, la combustion par un schéma réactionnel simplifié à quelques étapes seulement, le rayonnement par des méthodes de résolution de l'équation du transfert radiatif sur des bandes spectrales.
- Le **bain** est constitué de rouleaux de convection naturelle et forcée au sein desquels des mécanismes chimiques complexes purifient le verre. Les modèles comportent un solveur hydrodynamique (résolution des équations de Navier-Stokes) avec prise en compte des systèmes de bouilloneurs et électrodes d'appoint dans les équations de la quantité de mouvement et de l'énergie. Des dynamiques très complexes comme la cinétique des bulles de gaz, la dissolution des grains de sable sont également pris en compte.
- Le **batch** qui flotte à la surface du bain est le siège de mécanismes chimiques complexes. Les modèles les plus courants simplifient la chimie et l'écoulement dans cette zone, mais des efforts sont fait actuellement pour améliorer leur précision.

Ces modèles complets représentent les phénomènes sur des maillages de plusieurs millions de points de calcul dans l'espace du four, et permettent d'étudier des comportements locaux très fins. Toutefois, ils ont des temps de simulation très longs (plusieurs dizaines d'heures), qui les rend complètement inadaptés aux applications à temps de calcul limité. C'est le cas lorsque l'on doit calculer en temps réel (et souvent plus rapidement) le fonctionnement du four au sein d'algorithmes de contrôle (Model Based Control) [8], où pour des études paramétriques rapides. Dans ces applications, des modèles rapides sont nécessaires.

- 3) **Modèles rapides de four verrier** : Différentes méthodes existent pour simuler rapidement un four verrier. On distingue principalement les modèles empiriques (Data-Based) ou les modèles premiers-principes simplifiés.

Les **modèles empiriques** sont issus d'expériences sur le fonctionnement du four. On peut déterminer par des mesures des lois quantitatives reliant par exemple les débits de fuel aux températures de parois, ou des lois qualitatives entre les profils de température de la voûte et la qualité du verre en sortie. Grâce à ces lois, on peut prédire rapidement le comportement du four pour certaines conditions de fonctionnement. Les inconvénients principaux de ces modèles « boîtes-noires » sont de n'être valides que pour les conditions où ont été effectuées les mesures, et surtout de nécessiter des campagnes de tests longues et compliquées. Ils demandent donc un investissement important pour un domaine d'utilisation réduit.

Actuellement, l'application principale des modèles *Data-Based* est le contrôle prédictif. Grâce à des mesures particulières sur le système réel, on identifie les fonctions de transfert des principaux canaux de contrôle du four (débit air/gaz : températures de parois etc...). Ces fonctions de transferts permettent ensuite d'optimiser le pilotage du four grâce à des algorithmes multi-critères comme

Model Predictive Control. Différents outils d'aide à la conduite sont développés sur ce principe (sociétés Glass Services [www.gsl.cz](http://www.gsl.cz) [9], IPCOS <[www.ipcos.nl](http://www.ipcos.nl)>).

Les **modèles premiers-principes simplifiés** sont basés sur l'écriture des phénomènes physiques principaux au sein d'un four dont on a simplifié la géométrie. Les lois classiques de la physique (conservation de la masse, de l'énergie etc...) sont écrites à une échelle relativement grossière en compatibilité avec les simplifications de la géométrie. Les résultats de ces modèles sont donc des profils moyens qui représentent le fonctionnement global du four.

De nombreux modèles de ce type ont été développés au début de l'ère informatique, lorsque les puissances de calcul étaient encore limitées. Aujourd'hui, ils gardent tout leur intérêt pour les applications sus-citées (simulation rapide), et leur avantage est d'être valides sur des plages de fonctionnement aussi larges que l'on veut (il suffit pour cela d'écrire les équations sur la plage de fonctionnement correspondante). De nouvelles méthodes de réduction de modèles premiers-principes fins permettent également d'atteindre des temps de simulation très courts tout en gardant implicitement une formulation de la physique [10].

- 4) **Perspectives** : Aujourd'hui plus que jamais, les modèles de four à verre sont nécessaires, car des enjeux comme la fragilité de l'environnement et les limites des stocks d'énergie nécessitent d'optimiser (voire de repenser) les procédés de formation du verre actuels ainsi que leur pilotage.

A court terme, la priorité est au respect des législations sur l'environnement (directives européennes IPPC, protocole de Kyoto, de Göteborg), et des travaux sont nécessaires sur les systèmes de combustion à faible taux d'émission de polluants. A long terme, on pense que le principal potentiel d'optimisation se situe dans le bassin de fusion, et les solutions envisagées sont de séparer physiquement les différents processus de formation du verre (fusion, affinage primaire, homogénéisation) pour augmenter le rendement du four et la qualité du verre en sortie [11] [12]. Pour ces applications, des modèles fins sont utilisées.

Par rapport à d'autres industries, l'industrie verrière accuse un retard important dans les algorithmes de pilotage automatique. Aujourd'hui, les techniques *Model-Based* semble avoir donné une nouvelle orientation dans les outils d'aide à la conduite optimale des fours. Pour ces applications, des modèles rapides sont nécessaires, et les modèles premiers-principes simplifiés pourraient présenter un avantage non négligeable sur les modèles identifiés [13].

#### **Références :**

[1] Zarzycki, J. *Les verres et l'état vitreux*. Paris : Masson, 1982.

[2] Tooley, F.V. *The handbook of glass manufacture*. Books for industry, Inc. (1,2), 1974.

[3] Trier, W. *Glassschmelzöfen, Konstruktion und Betriebsverhalten*. Berlin : Springer Verlag, 1984.

[4] Rapport du GMIC. *Glass Industry Technology Roadmap*. (<http://www.gmic.org>), 2002.

- [5] Molet, D.A., Murnane, R.A. *Development of modeling techniques for glass furnaces*. In : First Int. Conf. on Advances in Glass, 1988. Vol. 13, p. 1-21.
- [6] Carvahlo, M.G., Speranskaia, N., Wang, J., Nogueira, M. *Modeling of glass melting furnaces : applications to control, design, and operation optimization*. In : *Advances in Fusion and Processing of Glass II.*, Ceramic Transactions, 1997. Vol. 82, p.109-135.
- [7] Urgan, A. *Numerical Simulation of Glass Melting Furnaces : A review*. In : Proc. of International Symposium on Glass Problems, 1996. Vol. 1, p. 351-366.
- [8] Carvahlo, M.G., Xeira, A.P., Nogueira, M. *Model-based operation optimisation of glass melting furnaces*. In : International Glass Journal, 1996. Vol. 89, p. 31-37.
- [9] Chmelar, J., Bodi, R., Muysenberg, E. *Supervisory advanced control of glass melters and forehearth by expert system*. In : Proc. of International Congress on Glass, 2001. Vol. 1, p. 247-254.
- [10] Backx, T.C., Huisman, L., Astrid, P., Beerkens, R. *Model-Based Control of Glass Melting Furnaces and Forehearths: First Principles-Based Model of Predictive Control System Design*. In : *Proc. of 63rd Conference on Glass Problems, 2002*. Vol. , p. 21-47.
- [11] Beerkens, R. *Future industrial glass melting concepts*. In : Proc. of International Congress on Glass, 2001. Vol. 1, p. 180-192.
- [12] Beerkens, R. *Modular Melting, Industrial Glassmelting Process Analysis*. In : American Ceramic Society Bulletin, 2004. Vol. 83(4), p. 28-32.
- [13] Achet, O. *Contribution à la modélisation des fours verriers*. Th. Sciences. 2005. Institut National Polytechnique de Lorraine.