

# Homogénéisation thermique par convection forcée d'un bain de verre fondu chauffé par induction.

Etienne ROUSSET<sup>1,3</sup>, Emilien SAUVAGE<sup>1,2</sup>, Steven DAIX<sup>1,3</sup>, Patrice BRUN<sup>1</sup>, Armand BONNETIER<sup>1</sup>, Jacques LACOMBE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEA - Marcoule, DEN/DTCD/SCDV/LDPV, BP 17171, 30207 Bagnols sur Cèze Cedex, France

<sup>2</sup>SIMAP Groupe EPM, ENSHMG, BP 95, 38402 Saint Martin d'Hères, France

<sup>3</sup>GrenobleINP, 46, avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble Cedex 1

**Résumé** - Cet article présente les différentes étapes permettant d'aboutir à une modélisation tridimensionnelle multiphysique d'un procédé de vitrification de déchets nucléaires de haute activité. Le dispositif étudié consiste en une charge de verre en fusion, chauffée par induction directe dans un creuset froid et homogénéisé par convection forcée. Les phénomènes thermiques, hydrodynamiques et électromagnétiques mis en jeu présentent entre eux un couplage fort. La partie thermo-hydrodynamique est calculée à l'aide du logiciel Fluent<sup>®</sup>. Le modèle hydrodynamique est validé à l'aide d'une maquette de similitude hydraulique. La partie électromagnétique est modélisée par le logiciel Flux<sup>®</sup>. Les valeurs de puissance calculées sont comparées aux mesures expérimentales relevées sur une unité de vitrification pilote de R&D. Un couplage itératif entre les deux logiciels permet d'appréhender les aspects multiphysiques du système de manière complète. Des phénomènes convectifs en surface ont pu être reproduits en simulation numérique et l'homogénéité thermique du volume de verre assurée par l'agitateur mécanique a été confirmée.

## Nomenclature

$c_p$	chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$		
$\vec{g}$	gravité, $m.s^{-2}$		<i>Symboles grecs</i>
$j$	densité de courant, $A.m^{-2}$	$\beta$	dilatabilité thermique, $K^{-1}$
$p$	pression modifiée, $Pa$	$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$Q_{th}$	densité de puissance volumique, $W.m^{-3}$	$\mu_e$	perméabilité du milieu, $H.m^{-1}$
$t$	temps, $s$	$\rho_0$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$T$	température, $K$	$\sigma$	conductivité électrique, $\Omega^{-1}.m^{-1}$
$T_0$	température de référence, $K$	$\Omega$	potentiel scalaire magnétique, $A$
$\vec{T}$	potentiel vecteur électrique, $A.m^{-1}$	$\tau$	tenseur des contraintes, $Pa$
$\vec{u}$	vecteur vitesse, $m.s^{-1}$		

## 1. Introduction

### 1.1. Contexte

La vitrification est utilisée depuis plus de 35 ans pour le traitement des déchets nucléaires de haute activité. Un nouveau procédé fonctionnant par induction directe en creuset froid est actuellement développé par le CEA et AREVA NC. L'objectif est de concevoir un dispositif dont la longévité et les performances répondent aux nouvelles exigences technologiques en matière de vitrification.

### 1.2. Principe de fonctionnement du dispositif

Le four est constitué d'un creuset sectorisé de 650 mm de diamètre et 1 m de hauteur, entouré d'un inducteur produisant un champ magnétique haute fréquence. La résistivité du

verre fondu, de l'ordre de  $5.10^{-2} \Omega.m$ , est suffisante pour permettre le développement des courants induits dans la masse et provoquer son échauffement par effet Joule. Les parois du four sont refroidies par circulation interne d'eau pressurisée.

L'intérêt du refroidissement est d'assurer la protection des parois du creuset contre la corrosion du verre en fusion en formant une fine couche solide appelée auto-creuset. Elle permet une isolation électrique, thermique et chimique des structures métalliques.

En fonctionnement nominal, la capacité du four est de 400 kg de verre chauffé à des températures supérieures à 1200 °C. L'inducteur fournit une puissance de 400 kW à une fréquence de 285 kHz. Un agitateur mécanique assure l'homogénéisation thermique et chimique de la matrice vitreuse.

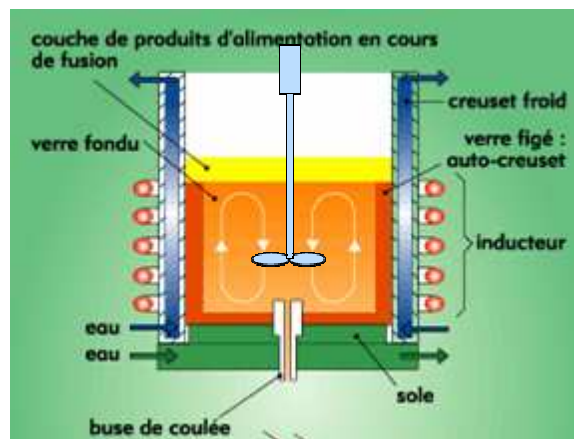


Figure 1 : Vue d'ensemble du procédé de vitrification en creuset froid.

L'environnement lié au procédé réunit de nombreux facteurs hostiles aux instruments de mesures : hautes températures, fluide corrosif, émission de gaz toxiques (vapeurs nitreuses), champs magnétiques élevés, installation confinée sous forte irradiation pour l'application industrielle. En conséquence, les moyens d'observation classiques sont difficiles à mettre en œuvre. Les mesures accessibles sont limitées et dédiées au pilotage du procédé. Elles concernent : les valeurs de température données par des thermocouples immergés dans le bain de verre ; les bilans de puissance provenant des circuits de refroidissement ; les valeurs de tension et courant délivrés à la sortie du générateur haute fréquence. Dans ce contexte, la modélisation numérique du système constitue l'outil idéal pour examiner les phénomènes agissant au cœur du procédé.

Dans cet article sont exposés les différents modèles employés pour décrire le four et le verre en fusion. Fort des contraintes liées au dispositif, des solutions sont adoptées afin de pouvoir confronter les modèles à des mesures expérimentales. Une fois validés séparément, les modèles sont intégrés dans un couplage multiphysique dont les résultats sont corrélés aux observations provenant de l'unité de vitrification industrielle.

## 2. Modèles utilisés

### 2.1. Modèle électromagnétique

La modélisation des phénomènes électromagnétiques est réalisée par le logiciel Flux<sup>®</sup>. Ce code utilise la méthode des éléments finis et permet de résoudre les problèmes magnétiques. Dans notre cas, la simulation est réalisée en modèle magnéto-harmonique pour une fréquence de 285 kHz. Le courant est imposé à l'inducteur de manière à obtenir, dans la masse de verre,

une puissance désirée. La géométrie est composée d'un inducteur virtuel non maillé, des parois latérales du creuset constituées d'inox, de l'agitateur et de la sole également en inox. Une couche isolante constituée d'air reproduit la présence de l'auto-creuset séparant le verre en fusion des structures en inox. A la fréquence considérée, l'épaisseur de peau dans l'inox est inférieure à 1 mm, on adopte alors une formulation en impédance de surface pour la résolution des zones en inox. L'épaisseur de peau dans le verre est de l'ordre de 20 cm, un maillage volumique est donc nécessaire pour le fluide. Une formulation vectorielle T-  $\Omega$  (potentiel vecteur électrique et potentiel scalaire magnétique) est utilisée. La formulation vectorielle T-  $\Omega$  dérive des équations de Maxwell écrites pour la magnéto-harmonique :

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \wedge \left( \frac{1}{\sigma} \vec{\nabla} \wedge \vec{T} \right) + \mu_e \frac{\partial}{\partial t} (\vec{T} - \vec{\nabla} \Omega) &= \vec{0} \\ \vec{\nabla} \cdot \left( \mu_e \frac{\partial}{\partial t} (\vec{T} - \vec{\nabla} \Omega) \right) &= \vec{0}\end{aligned}\quad (1)$$

## 2.2. Modèle hydrodynamique

Les hypothèses admises pour la modélisation hydrodynamique sont les suivantes :

- la modélisation numérique est limitée à la zone du bain de verre ; une condition de vitesse nulle est imposée sur les parois ; la surface libre du bain est plane et est soumise à une condition de contrainte nulle,
- la résolution est instationnaire et tridimensionnelle,
- l'écoulement est supposé laminaire, le nombre de Reynolds est de l'ordre de 40,
- le verre modélisé est supposé Newtonien et incompressible.

Le logiciel Fluent<sup>®</sup> est utilisé pour la résolution des phénomènes hydrodynamiques. Ce dernier résout les équations de Navier-Stokes à l'aide de la méthode des volumes finis.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \nabla \cdot \vec{\tau} \quad (3)$$

## 2.3. Modèle thermique

L'effet Joule constitue la principale source de chaleur dans la fonte verrière. Les verres considérés dans notre étude sont opaques ainsi les transferts radiatifs ou rayonnement interne ne sont pas pris en compte. L'approximation de Boussinesq est considérée car la dilatation du verre est faible dans la gamme de température atteinte. Les transferts thermiques dans le verre en fusion ont donc deux origines : la conduction et la convection due aux mouvements macroscopiques du fluide. Un terme de convection naturelle  $-\rho_0 \beta (T - T_0) \vec{g}$  est alors ajouté à l'équation hydrodynamique (3) tandis que l'équation de la chaleur est également résolue :

$$\rho_0 \left( \frac{\partial c_p T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) c_p T \right) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + Q_{th} \quad (4)$$

La chaleur spécifique et la conductivité thermique sont variables avec la température. Le terme source  $Q_{th}$  représente la puissance spécifique dissipée dans le bain de verre et assure le couplage avec l'électromagnétisme.

## 2.4. Modèle couplé

La puissance joule dissipée dans la charge de verre est de l'ordre de  $0,5 \text{ kW.m}^{-3}$ . Le couplage entre le modèle électromagnétique et thermo-hydrodynamique se fait par l'intermédiaire de cette carte de puissance qui est obtenue à partir des grandeurs électromagnétiques :

$$Q_{\text{th}} = j^2 / 2\sigma \quad (5)$$
$$\vec{j} = \vec{\nabla} \wedge \vec{T}$$

La conductivité électrique est variable avec la température. Elle est donc calculée à l'aide du modèle thermo-hydrodynamique avant d'être réintroduite dans le modèle électromagnétique. Le couplage entre les deux logiciels est assuré par un échange de données toutes les vingt secondes de temps physique ce qui constitue un compromis raisonnable entre temps de calcul et précision [1].

## 3. Validation, comparaison aux données expérimentales

### 3.1. Modèle électromagnétique

Dans le cas d'un four vide de verre, il demeure des sources thermiques au niveau des éléments constitués d'inox du fait des pertes joules créées par les courants de Foucault. Les structures métalliques sont refroidies par écoulement d'eau pressurisée, ce qui permet de mesurer l'énergie thermique dissipée à l'aide de bilans de puissance entre les débits d'entrée et de sortie des circuits calorifugés. Les densités de puissance joule se concentrent principalement dans l'élément de fond du four (sole) et les parois verticales (creuset).

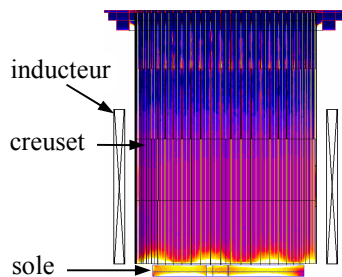


Figure 2 : Isocontours de densité surfacique de puissance joule calculée. Echelle:  $[0;8] \text{ W.m}^{-2}$ .

	Bilan thermique (essai)	Puissance calculée (simulation)
Puissance dans le creuset (kW)	70	73
Puissance dans la sole (kW)	3,8	3,8

Tableau 1 : Pertes thermiques par effet joule sur les structures. Valeurs mesurées par bilan thermique sur le pilote industriel et valeurs issues de la simulation.

Les mesures relevées dans le tableau 1 sont obtenues à 1600 A et 1500 V aux bornes de l'inducteur. Elles montrent des écarts inférieurs à 5 % entre les valeurs de puissance calculées et celles issues du dispositif expérimental. Les simplifications géométriques et les formulations utilisées pour le calcul numérique paraissent cohérentes.

### 3.2. Modèle hydrodynamique

Le comportement hydraulique du système est approché expérimentalement par similitude hydraulique sur des maquettes en plexiglas à l'échelle une [2]. Le verre en fusion est remplacé par de l'huile de viscosité cinématique homogène (environ  $2.10^{-3} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ ) égale à celle du verre à sa température d'élaboration. L'écoulement induit par l'agitateur est ensuite caractérisé à

l'aide de mesures de champs bidimensionnels de vitesses faisant appel à une technique de vélocimétrie par images de particules (PIV) représentée sur la figure 3.

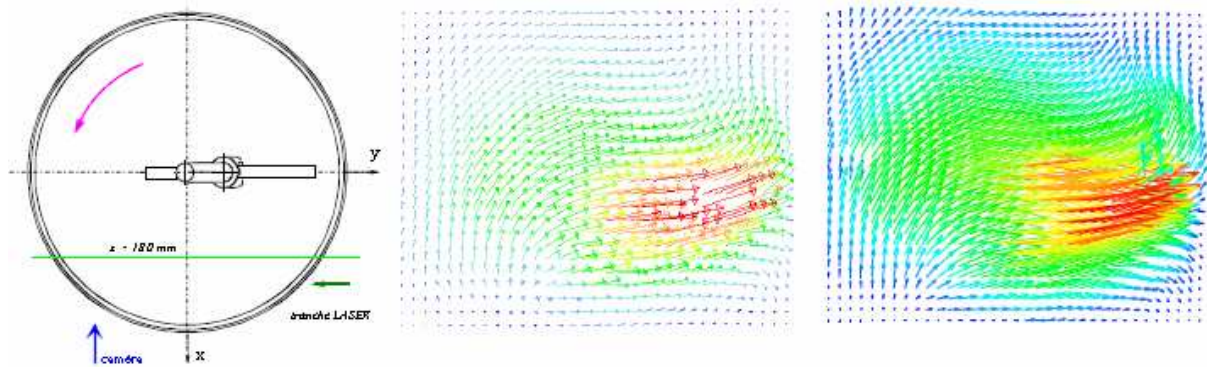


Figure 3 : Champs de vitesse instantanée obtenus numériquement (à gauche) et expérimentalement (à droite). Vitesse de rotation : 50 tr/min. Echelle:  $[0; 0,375] m.s^{-1}$ .

A la vitesse d'agitation considérée, l'écoulement est laminaire. Une comparaison qualitative des champs de vitesses simulés et expérimentaux montre que les écarts sont faibles. Des mesures de vitesse locale en divers points du bain, par vélocimétrie laser doppler (VLD) permettent de corroborer ces observations par des valeurs quantitatives.

### 3.3. Couplage 3D complet

L'agitation et l'architecture du four imposent un calcul thermohydrodynamique tridimensionnel transitoire. De même, la présence de l'agitateur métallique refroidi produit des effets magnétiques significatifs ce qui rend une résolution électromagnétique 3D nécessaire [3].

En présence d'une forte puissance injectée, on visualise à la surface de la matrice vitreuse non agitée, des cellules thermoconvectives dont les tailles ( $\sim 10$  cm) et les temps caractéristiques d'apparition ( $\sim 15$  min) peuvent être retrouvés en simulation avec le modèle numérique couplé [4]. Cela donne une première indication sur la justesse du modèle.

Dans le cas d'une configuration avec agitation mécanique, les échanges thermiques sont intensifiés dans le four notamment au niveau des parois froides. Une des difficultés réside dans la modélisation des transferts thermiques entre le verre en fusion et le système de refroidissement. En effet, les zones où se forme l'auto-creuset (couche de verre solide), sont soumises à d'importants gradients thermiques. Sur une épaisseur inférieure à 10 mm par endroits, la température du verre passe de 1200 °C à 200 °C. Cela engendre une modification extrême des propriétés du fluide dépendantes de la température (viscosité, conductivité électrique et thermique). La conductivité thermique du verre par exemple varie de 20 à 1  $W.m^{-1}.K^{-1}$ . Pour modéliser les échanges thermiques aux parois de façon simplifiée, une approche consiste à définir les conditions aux limites à l'aide de la loi phénoménologique de Newton. Le coefficient d'échange thermique est alors ajusté de façon à obtenir un modèle reproduisant des valeurs de puissance et de température similaires aux mesures expérimentales.

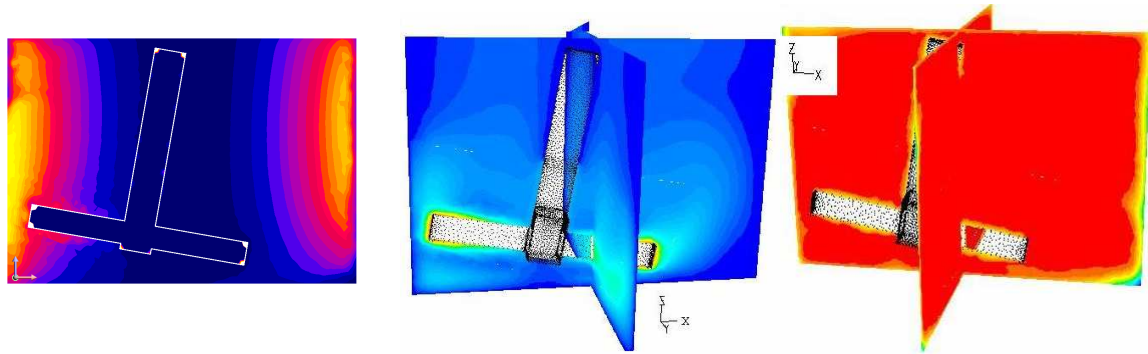


Figure 4 : De gauche à droite : densité de puissance joule (échelle:  $[0 ; 7.10^6] W.m^{-3}$ ), module de la vitesse (échelle:  $[0 ; 1] m.s^{-1}$ ) et température (échelle:  $[800 ; 1250] ^\circ C$ ) à l'intérieur du verre.

Les densités de puissance joule créées par les courants induits sont distribuées, dans la masse de verre, en forme de lobe à la circonférence du bain. La convection forcée produite par l'agitateur est plus importante à proximité des pales et au centre du volume de verre. On constate sur la figure 4 que l'effet produit est une répartition de température très homogène dans le volume.

#### 4. Conclusion

La modélisation 3D du verre chauffé par induction repose sur des modèles électromagnétique et hydrodynamique validés indépendamment. La prise en compte des phénomènes thermiques permet d'obtenir un modèle complet du fait de la forte dépendance des propriétés du verre avec la température. Les simulations intégrant le couplage multiphysique produisent des résultats qualitatifs en accord avec les observations expérimentales. Le calcul précis des puissances et des températures à l'intérieur du bain de verre s'avère néanmoins plus délicat compte tenu de la complexité des échanges thermiques provoqué par le verre refroidi aux parois. Par ailleurs, le modèle couplé indique que la convection forcée créée par l'agitateur à 50 tr/min est adéquate pour l'homogénéisation du bain de verre en température.

#### Références

- [1] L. Jacoutot, Modélisation numérique de phénomènes couplés dans des bains de verre brassés mécaniquement et élaborés en creuset froid inductif, *Thèse I.N.P.G.*, 2006.
- [2] R. Riva & all, Modélisation 3D thermique et hydrodynamique de l'élaboration de verre en creuset froid chauffé par induction, *Récents progrès en Génie des Procédés*, Numéro 92 - 2005, Ed. Lavoisier.
- [3] E. Sauvage, Localisation tridimensionnelle de répartition de densité de puissance Joule dans un bain de verre chauffé par induction, *Société Française de la Thermique*, 2007.
- [4] E. Sauvage, Thermoconvective instabilities of molten glass heated by direct induction in a cold crucible, *International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing* (Hanovre, 27-29 Oct. 2008), 151-156.