



**HAL**  
open science

# Couplages entre équations de Navier-Stokes et modèles de transport dans les fontes verrières Analogies entre énergie et platinoïdes

G. Barba Rossa, E. Sauvage, A. Gagnoud

► **To cite this version:**

G. Barba Rossa, E. Sauvage, A. Gagnoud. Couplages entre équations de Navier-Stokes et modèles de transport dans les fontes verrières Analogies entre énergie et platinoïdes. 15èmes Journées Scientifiques de Marcoule (JSM - 2015), Jun 2015, Bagnols sur Cèze, France. cea-02491642

**HAL Id: cea-02491642**

**<https://cea.hal.science/cea-02491642>**

Submitted on 26 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Introduction

Dans le cadre de la modélisation-simulation du creuset froid inductif pour la vitrification des déchets radioactifs de haute activité, le LDPV se concentre sur le choix des modèles physiques. L'objectif est d'obtenir une simulation numérique prédictive des phénomènes mis en jeu dont l'influence sur le procédé doit être comprise en vue des optimisations futures.

Le bain de verre chargé en platinoïdes (particules non dissoutes de ruthénium, palladium,...), est porté à une température chaude imposée de près de 1200°C par induction directe tandis que le creuset est refroidi à une centaine de degrés et donc soumis à un flux thermique important en provenance du verre. Température et platinoïdes modifient à la fois la masse volumique du verre  $\rho$  ainsi que son comportement rhéologique (loi de viscosité dynamique  $\eta$ ). Ces propriétés variables entraînent des couplages entre équations de Navier-Stokes et transport de l'énergie thermique et des platinoïdes, qui se révèlent déterminants pour le comportement de la fonte.

$\rho$  : masse volumique

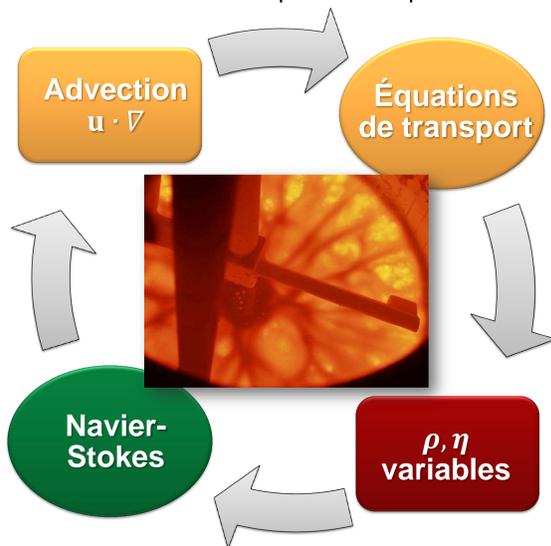
$\eta$  : viscosité dynamique

$\lambda$  : conductivité thermique

$\kappa$  : diffusivité des particules

$\beta$  : dilatabilité thermique

$\tau$  : vitesse de sédimentation



## EQUATIONS DE NAVIER-STOKES INCOMPRESSIBLE

Régissent le mouvement du verre fluide (vitesse  $\mathbf{u}$  / pression  $p$ )

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \mathbf{u} \cdot \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta \nabla \mathbf{u}) + \tau \nabla \mathbf{u} \cdot \nabla \eta + \rho \mathbf{g}$$

## COUPLAGE PAR VISCOSITÉ $\eta$ VARIABLE [4, 5, 6]

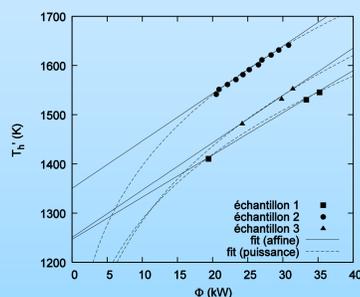
Dépendance à la température : rhéologie de Vogel-Fulcher-Tammann

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{B}{R(T - T_v)}\right)$$

- Formation d'une couche de verre solide sur les parois refroidies
- Modification des lois de corrélation du flux thermique en fonction de la température chaude  $\phi = f(T_h)$
- Indépendance du flux thermique à la température froide et à la qualité du contact thermique



Reliquat de verre issu d'une fonte en creuset froid, au contact du creuset refroidi

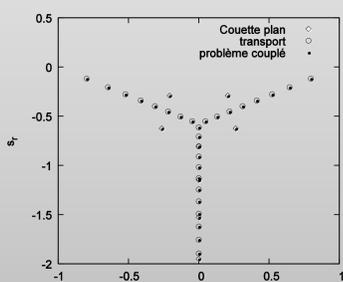


Comparaison des lois de corrélation  $\phi = f(T_h)$  avec des mesures sur creuset froid

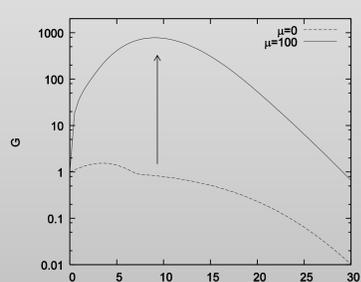
Dépendance au taux de platinoïdes : rhéologie de Cross/Quemada/Einstein

$$\eta(C) = \eta_0 \exp(\mu C) \text{ à faible taux de cisaillement}$$

- Analyse de stabilité linéaire temporelle d'un écoulement faiblement cisailé (Couette plan) : spectre stable invariant mais forte croissance non-normale de cellules convectives chargées en platinoïdes



Spectre des valeurs propres du problème de stabilité linéaire – toutes les valeurs sont dans le demi-plan stable



Croissance d'énergie maximale transitoire

## ADVECTION DANS LES EQUATIONS DE TRANSPORT [1, 2]

Advection/diffusion de l'énergie thermique

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

$T$  température locale

L'énergie thermique est advectée par le fluide. Le terme diffusif modélise la diffusion thermique de Fourier ainsi que le rayonnement interne peu pénétrant (verres utilisés optiquement épais).



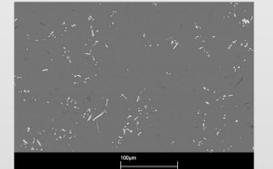
Énergie thermique

Advection/diffusion/sédimentation des particules de platinoïdes

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C + \nabla \cdot (\tau \hat{\mathbf{g}} C (1 - C)^\alpha) = \nabla \cdot (\kappa \nabla C)$$

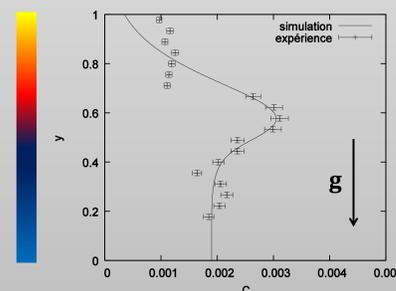
$C$  fraction volumique en particules locale

Les particules sont considérées comme une phase continue, advectée par le fluide. La diffusion est d'origine hydrodynamique.



Cliché MEB de particules de dioxyde de ruthénium dans un simulant de verre nucléaire

- Agglomération de platinoïdes par sédimentation dans un verre au repos soumis à un gradient thermique pendant 65h [7]



Profil de fraction volumique en fonction de la hauteur dans l'échantillon – comparaison au modèle

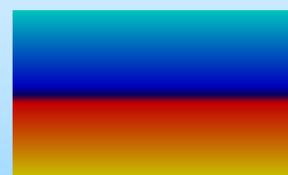


Mesures de fraction volumique par Laser Induced Breakdown Spectroscopy

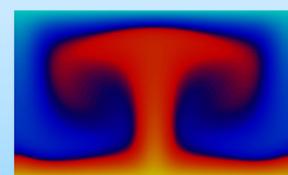
Platinoïdes

## COUPLAGE PAR MASSE VOLUMIQUE $\rho$ VARIABLE [3]

Le fluide chaud est moins dense, entraînant l'instabilité convective de Rayleigh-Bénard



Evolution d'une stratification instable de température

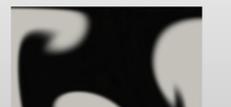


Cellules de Rayleigh-Bénard obtenues par simulation du creuset froid

Le fluide chargé en particules de platinoïdes est plus dense, entraînant l'instabilité de Rayleigh-Taylor

Variations relatives de masse volumique comparables

$$\frac{|\Delta \rho|}{\rho} = \left\{ \left( \frac{\rho_p}{\rho} - 1 \right) \Delta C \right\} \sim 1\%$$



Evolution d'une stratification instable de fraction volumique de platinoïdes

Énergie thermique

Platinoïdes

## Perspectives

Les premières études de ces phénomènes de couplage et les comparaisons en cours avec des expériences à l'échelle du laboratoire ou du procédé de vitrification permettent d'attester la pertinence des modèles continus retenus et l'importance de la prise en compte des couplages. L'implémentation des modèles dans une simulation 3D électro-thermo-hydraulique complète du creuset froid est en cours. A terme, elle constituera un outil clé pour l'optimisation et le diagnostic du procédé.

## Références

- [1] Michael I. OJOVAN et W. E. LEE : *New Developments in Glassy Nuclear Wasteforms*. Nova Science Publishers, Inc., 2007.
- [2] Rachel PLIEGER, Leila LEFEBVRE, Mohammed MALKI, Mathieu ALLIX et Agnès GRANDJEAN : Behaviour of ruthenium dioxide particles in borosilicate glasses and melts. *Journal of Nuclear Materials*, 389:450–457, 2009.
- [3] F. PLA, A. M. MANCHO et H. HERRERO : Bifurcation phenomena in a convection problem with temperature dependent viscosity at low aspect ratio. *Physica D : Nonlinear Phenomena*, 238:572–580, 2009.
- [4] Syakila AHMAD, Norihan M. ARIFIN, Roslinda NAZAR et Ioan POP : Mixed convection boundary layer flow past an isothermal horizontal circular cylinder with temperature-dependent viscosity. *International Journal of Thermal Sciences*, 48:1943–1948, 2009.
- [5] Jean PUIG, Caroline HANOTIN, Muriel NEYRET et Philippe MARCHAL : High temperature rheological study of borosilicate glasses containing platinum group metal particles by means of a mixer-type rheometer. Manuscript soumis pour publication, (2015).
- [6] Rong LIU et Qisheng LIU : Non-modal instabilities of two-dimensional disturbances in plane Couette flow of a power-law fluid. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 165:1228–1240, 2010.
- [7] J. KLOUZEK et A. FRANEK : Modeling of particle settling in high viscosity liquid. *Ceramics-Silikaty*, 45:70–75, 2001.