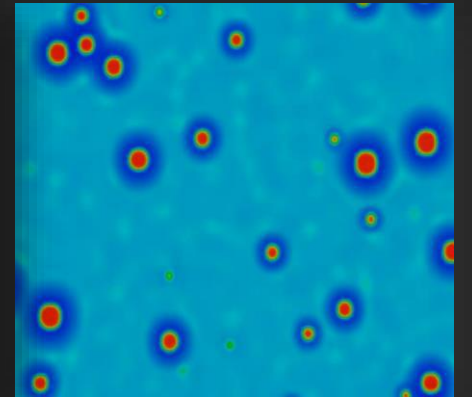
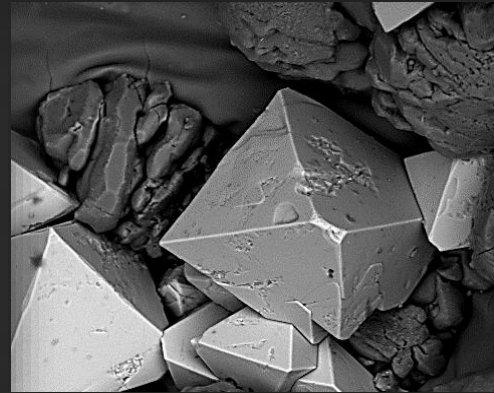
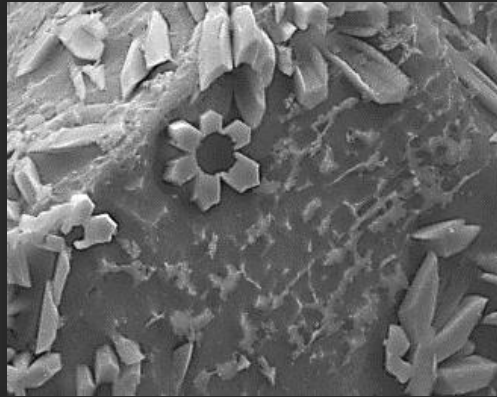
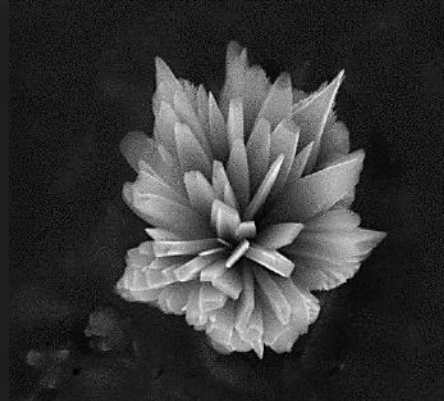
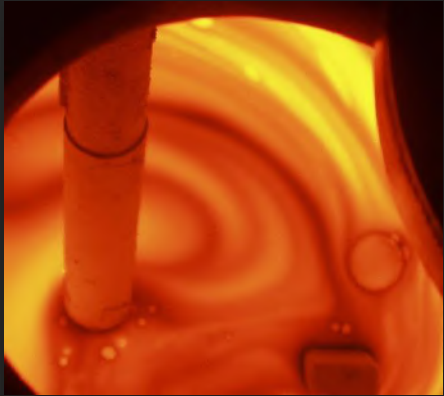


# **Elaboration de matrices vitreuses de conditionnement de déchets radioactifs – Les dernières avancées**

Sophie Schuller, Emilien Sauvage, Dorain Beslay, Elise Regnier



CEA, DES, ISEC, DPME - Département de recherche sur les Procédés et Matériaux pour les Environnements complexes  
Université de Montpellier, F-30207, Bagnols-sur-Cèze Cedex, France

# Création du CEA/ISEC en 2020

Institut des Sciences et des technologies pour une Economie Circulaires des énergies bas carbone

Maîtriser le cycle des matières des énergies bas carbone pour  
réussir la Transition Climat-Energie



## Décarbonation

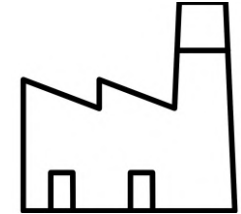
- Soutien au nucléaire actuel (aval du cycle)
- Recherche sur nucléaire du futur (SMR, AMR, RNR...)
- Soutien aux opérations d'assainissement  
démantèlement des installations nucléaires
- Soutien aux énergies renouvelables (Batteries,  
hydrogène, PV)
- Décarbonation de l'industrie (électrification des  
procédés, efficacité énergétique)

## Economie circulaire

- Combustible nucléaire
- Recyclage des matériaux (métaux, verres...),  
écoconception
- Gestion des déchets ultimes



# Enjeux : Optimisation des verres de conditionnement de déchets radioactifs



## Cahier des charges

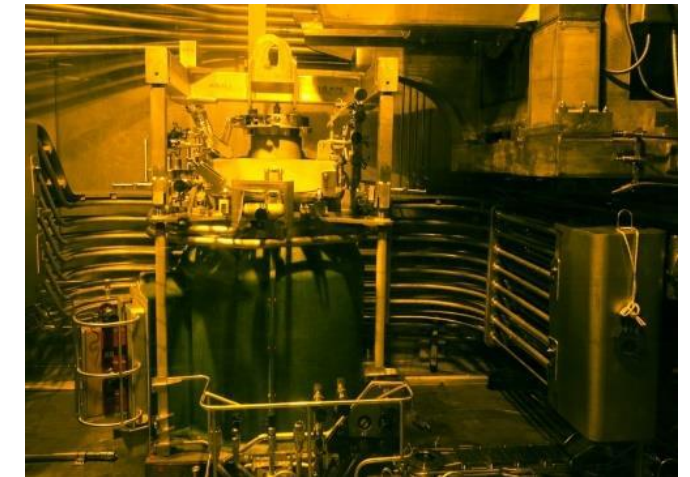
→ Spécification des déchets nucléaires, composition, quantité, radioactivité, taux de charge en déchets



## Optimisation matrice de conditionnement

Faisabilité technologique, qualité/homogénéité, comportement à long terme

## Optimisation /Meilleurs compromis



## Optimisation procédés de vitrification industriel

Robustesse, maintenabilité, conditions d'élaborations optimales (T, agitation, durée d'affinage)



# Optimisation de la vitrification des déchets radioactifs

## → Une approche intégrée de R&D

### Cahier des charges

→ Spécification des déchets nucléaires, composition, quantité, radioactivité, taux de charge en déchets



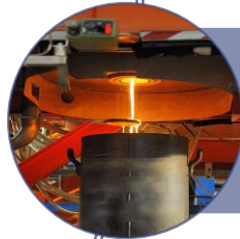
### Soutien industriel et opérationnel

Soutien industriel des procédés de traitement et conditionnement des déchets, Expertise agrément colis finaux



### Technologies numériques

Jumeau numérique, Simulation immersive, téléopération, robotique, mesures nucléaires



### Qualification jusqu'à l'échelle industrielle

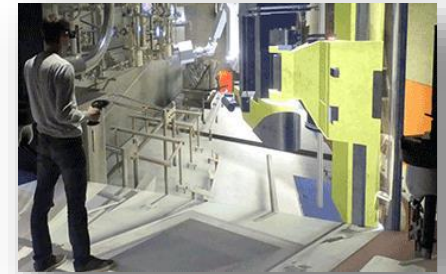
Développement de technologie de vitrification, essais sur prototypes inactifs maquette et échelle 1, optimisation des procédés, tests de robustesse, essais en actif



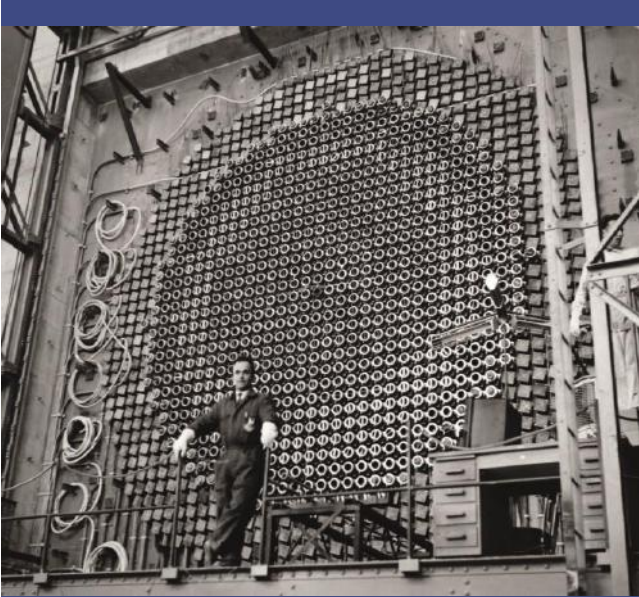
### Etude des matrices de conditionnement

Formulation, élaboration, caractérisation, détermination des propriétés physico-chimiques, étude du comportement à long terme des verres

Approche de modélisation/  
simulation multi-  
échelles  
multiphysiques



# Principaux types de déchets nucléaires de haute et moyenne activité



**Réacteur nucléaire  
Uranium Naturel Graphite  
Gaz (UNGG)**

Déchets de hautes activités  
issus des combustibles usés  
militaires

**Uranium Molybdène (UMo)**  
  
**(30 oxydes)**



**Réacteur à eau pressurisé  
(REP) – 56 réacteurs en  
France**

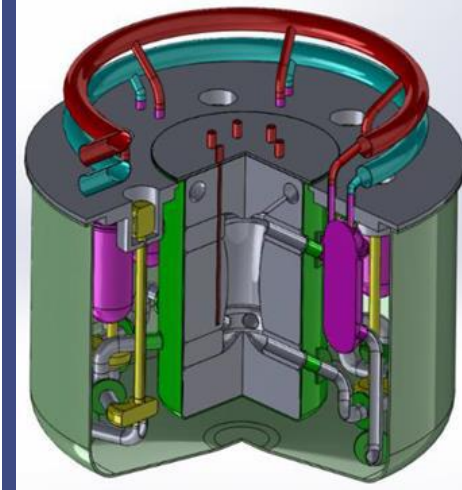
Déchets de hautes activités  
issus des combustibles  
actuels

**Uranium Oxyde (UOx)**  
  
**(40 oxydes)**



**Assainissement  
démantèlement**

Déchets de moyennes  
activités issus de rinçage  
d'usine en  
démantèlement, eaux  
contaminées Fukushima  
**Adsorbant eaux  
contaminées  
(10 à 15 oxydes)**



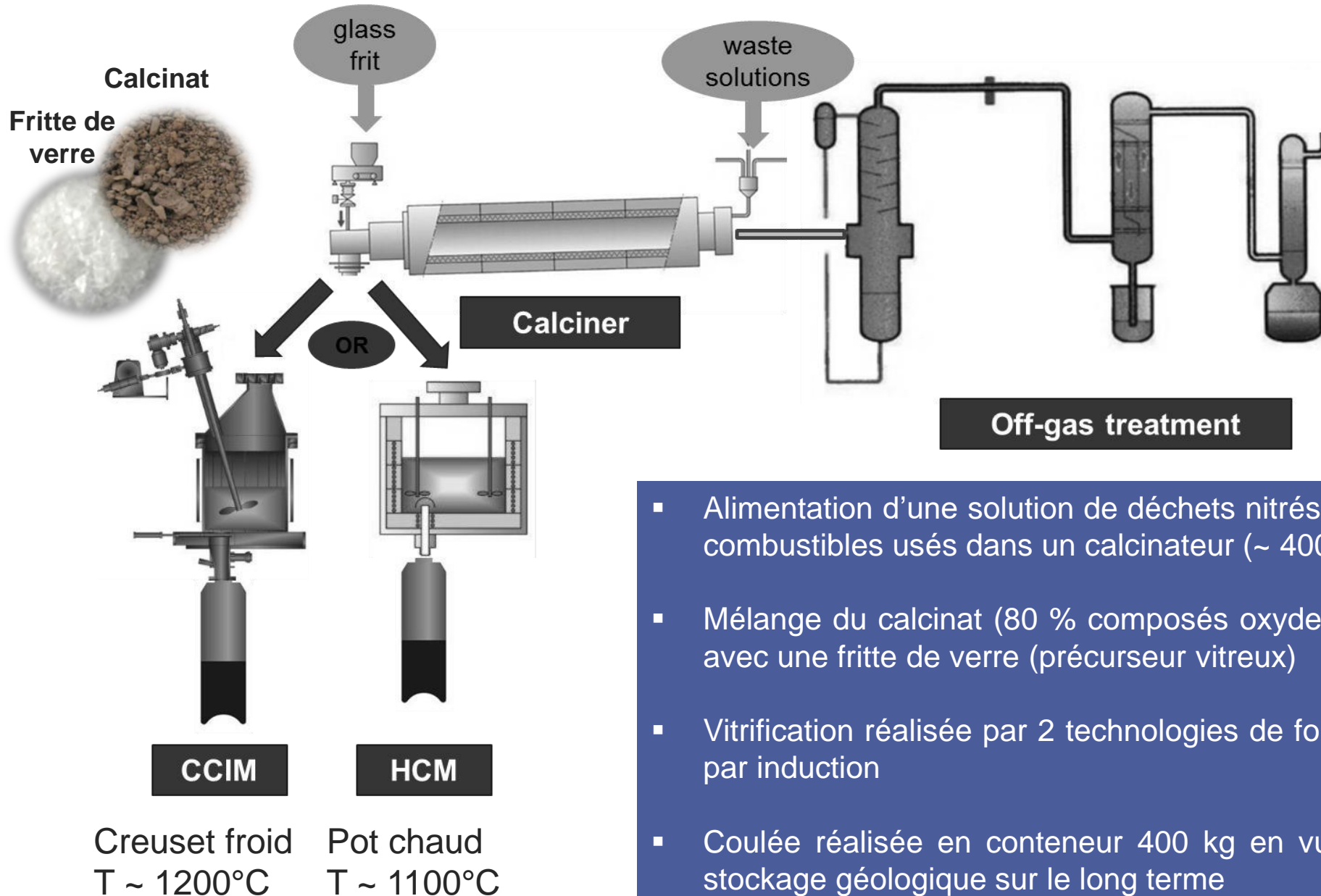
**Réacteur génération  
IV**

***Réacteurs à sels  
fondus***

**Déchets alcalins  
alcalino-terreux  
(5 à 10 oxydes)**



# Procédés de calcination-vitrification actuels



- Alimentation d'une solution de déchets nitrés issus du retraitement des combustibles usés dans un calcinateur (~ 400°C)
- Mélange du calcinat (80 % composés oxydes, 20 % composés nitrés) avec une fritte de verre (précurseur vitreux)
- Vitrification réalisée par 2 technologies de four d'élaboration chauffées par induction
- Coulée réalisée en conteneur 400 kg en vu d'un entreposage et un stockage géologique sur le long terme

# Processus d'élaboration des verres de conditionnement en creuset froid

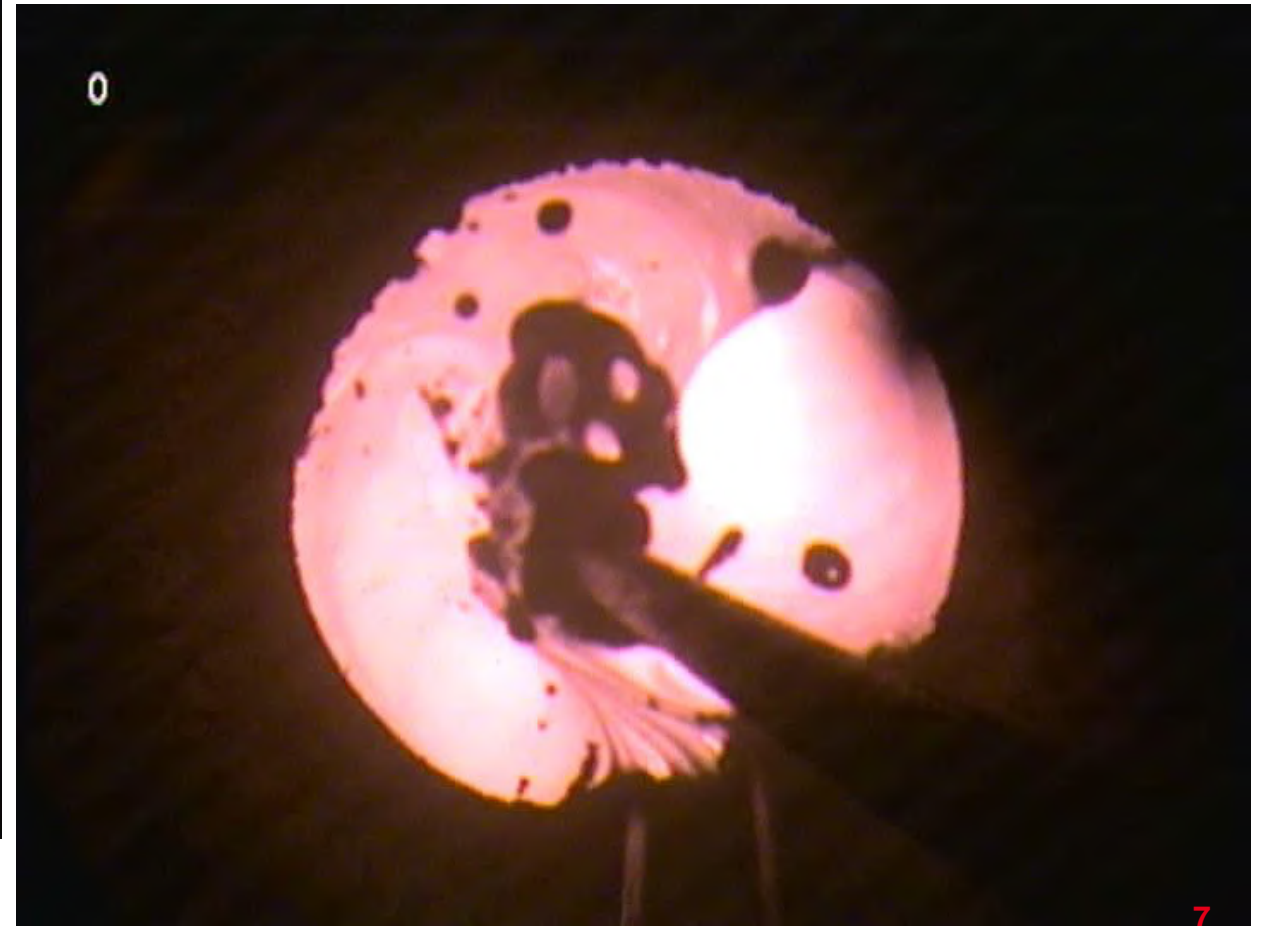


Exemple d'élaboration de verres en four chauffé par induction directe (creuset froid)

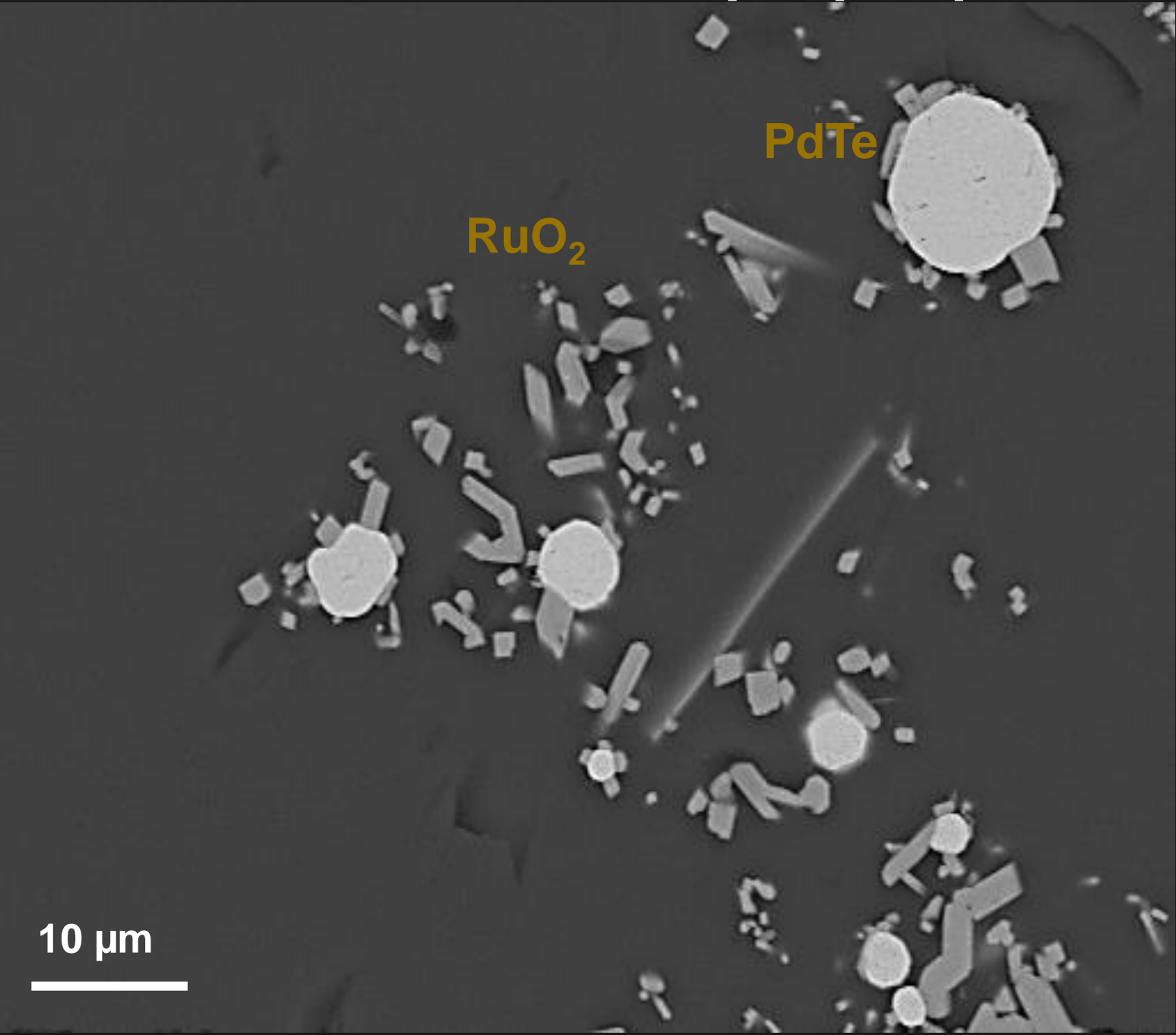
*Alimentation calcinat + fritte de verre*



*Alimentation liquide + fritte de verre*



Caractérisation des réactions chimiques qui se produisent lors de l'élaboration d'un verre UOX



Fritte de verre  
FNOC57

| Mass. % Oxyde                  |       |
|--------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 58,84 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,28  |
| B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 18,15 |
| Na <sub>2</sub> O              | 7     |
| Li <sub>2</sub> O              | 2,56  |
| CaO                            | 3,24  |
| ZnO                            | 5,23  |
| ZrO <sub>2</sub>               | 0,7   |

+

non radioactif

Calcinat de  
type UOX



MEBE : Col ISCM  
R. Podor

Composés

- NaNO<sub>3</sub>
- CsNO<sub>3</sub>
- RbNO<sub>3</sub>
- Sr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>
- Ba(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>
- Te(OH)<sub>6</sub>
- SeO<sub>2</sub>
- H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>
- Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O
- Na<sub>2</sub>SnO<sub>3</sub>.3H<sub>2</sub>O
- Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
- RuNO(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>
- Zr(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>.4H<sub>2</sub>O
- Cr(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O
- H<sub>3</sub>[PMo<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]
- Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.9H<sub>2</sub>O
- La(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O
- Ce(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O
- Pr(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.xH<sub>2</sub>O
- Nd(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>.xH<sub>2</sub>O

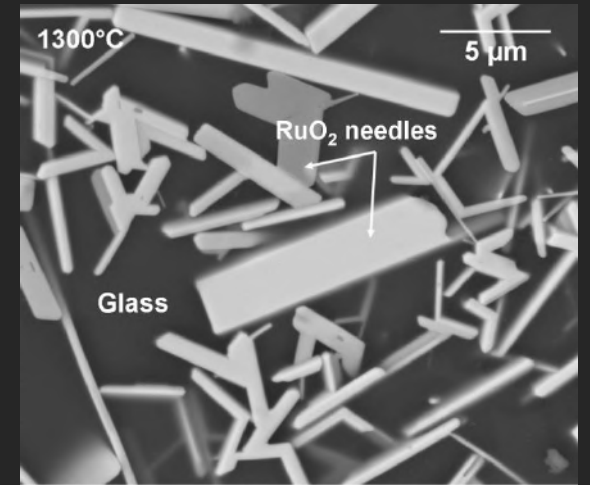


# **R&D élaboration des verres actuels (combustibles usés de type Uranium OXyde) en creuset froid**

→ **Optimisation/prédiction des conditions d'élaboration**

1- Quantification et modélisation des processus réactionnels lors de l'élaboration des verres de conditionnement ?

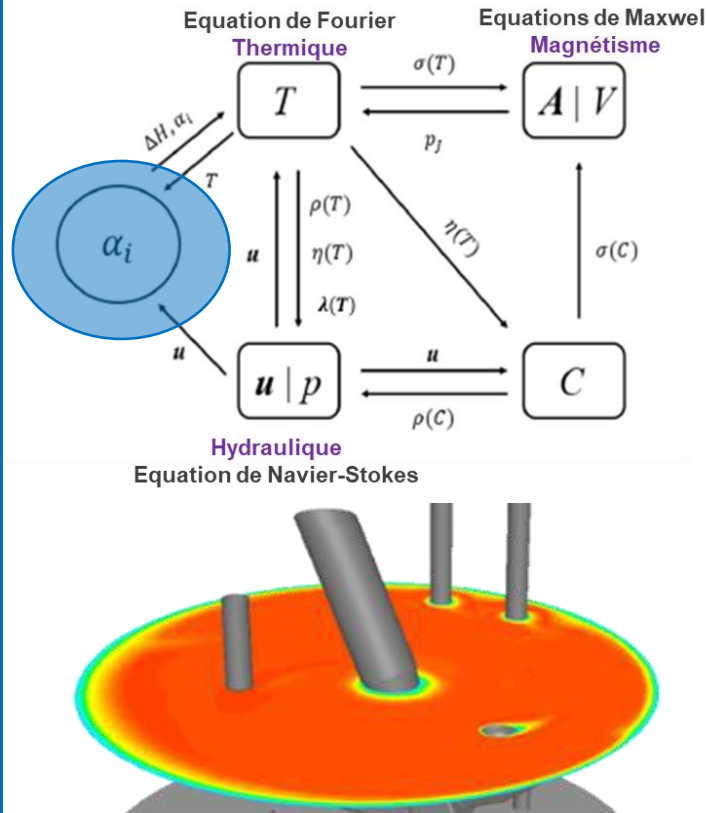
2- Prise en compte de l'influence des platinoïdes sur les propriétés physico-chimiques des verres (viscosité)



# 1- Simulation multiphysiques de l'élaboration des verres radioactifs

→ **Prise en compte de la chimie/thermique de l'élaboration**

## Modèle Magnéto-Thermo-Hydraulique



Thèse Guillaume Barba Rossa 2017

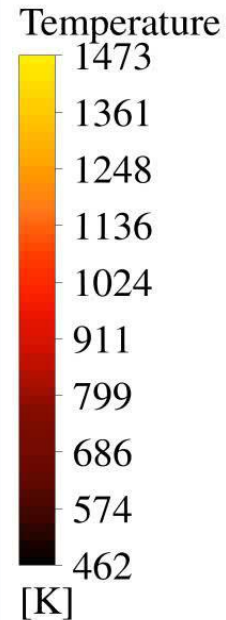
E. Sauvage WM2010 Phoenix Arizona 2010

$(\alpha_i)$  : Degré d'avancement  
de la réaction

## Simulation/expérience en four résistif type Saint Gobain

Time = 10 [ s ]

Thermocouple



Simulation de l'élaboration d'un verre R7T7  
dans un creuset chauffé par effet résistif à  
1200°C

Thermocouples de  
mesure



Expérience : Apport de calcinat à la surface  
du bain de verre

Paraiso K, Sauvage E, Schuller S, Hocine S, Lemaître V, Burov E. Characterization and modeling of chemical reactions taking place during the vitrification of high level nuclear waste. Journal of Nuclear Materials 2022

# Détermination degré d'avancement de la réaction ( $\alpha_i$ )

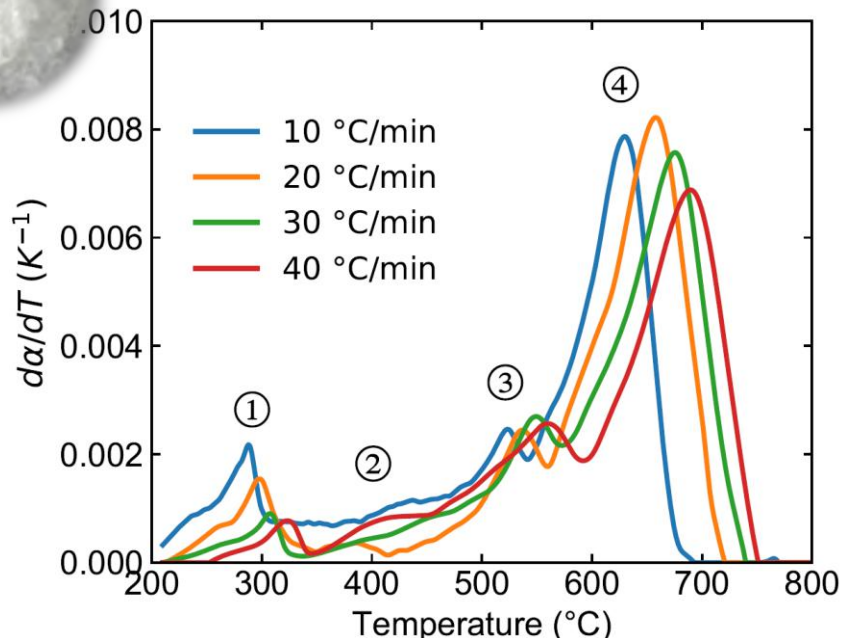
## Détermination du degré d'avancement des réactions de dénitruration par ATD

$$\frac{d\alpha}{dt} = \beta^{-1} \frac{|\phi_{\text{net}}(T)|}{\int_{T_i}^{T_f} |\phi_{\text{net}}(T)| dT}$$

- Flux endothermiques associés à la décomposition des nitrates (terres rares, alcalino-terreux, alcalins, ...)
- Corrélation entre la rampe de montée en température et le déplacement des pics vers des températures plus élevées

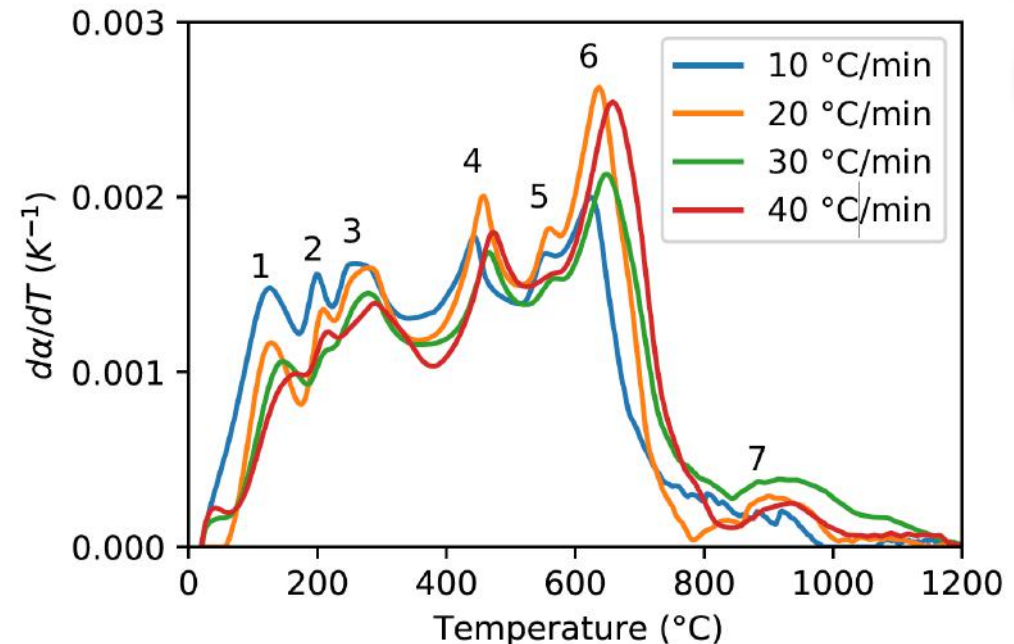
## Décomposition des nitrates au cours de l'élaboration du verre

Fritte de verre + Calcinat  
(~20% de nitrates)



K. Paraiso, E. Sauvage, S. Schuller et al. Characterization and modeling of chemical reactions taking place during the vitrification of high level nuclear waste. Journal of Nuclear Materials 2022

Fritte de verre + déchet séché  
(~100% de nitrates)



E. Sauvage, S. Schuller, Z. Nabyt et al. Liquid feed vitrification of high-level nuclear waste: Description and modelling of chemical reactions. Submitted Journal of Nuclear Materials 2024



# Détermination des paramètres cinétiques

La vitesse de réaction peut être exprimée en fonction du degré de conversion selon une loi d'Arrhenius

$$\frac{d\alpha}{dt} = \sum_{i=1}^n w_i A_i (1 - \alpha_i)^{n_i} \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) \quad \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

$\alpha_i$  = Degré d'avancement de la réaction

$w_i$  = Poids des réactions

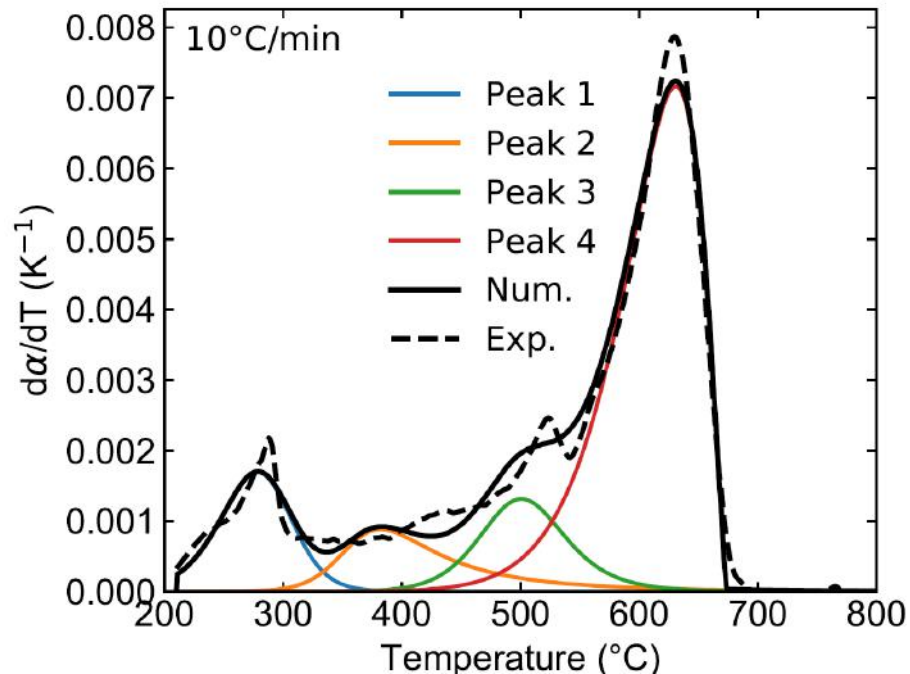
$A_i$  = Facteur pré-exponentiel

$E_i$  = Energie d'activation des réactions de décomposition des nitrates

$n = 4$

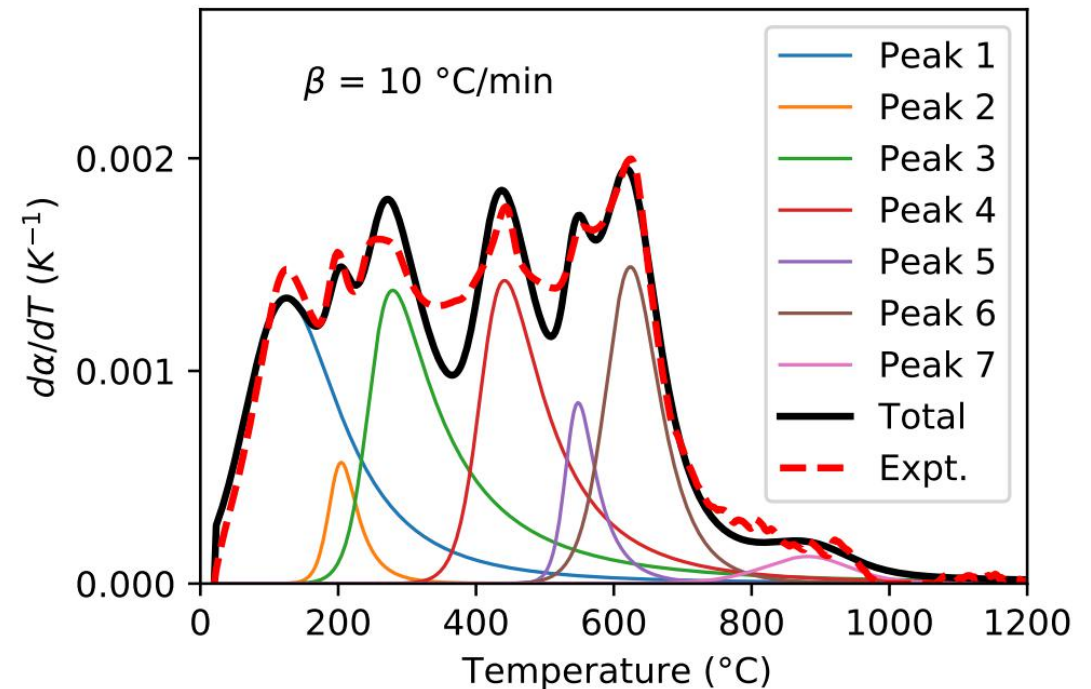


$\beta$  : Rampe 10°C/min



Fritte de verre + Calcinat (~20% de nitrates)

$n = 7$

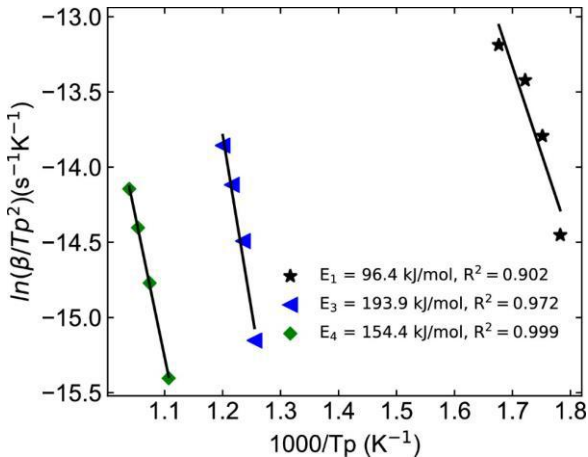
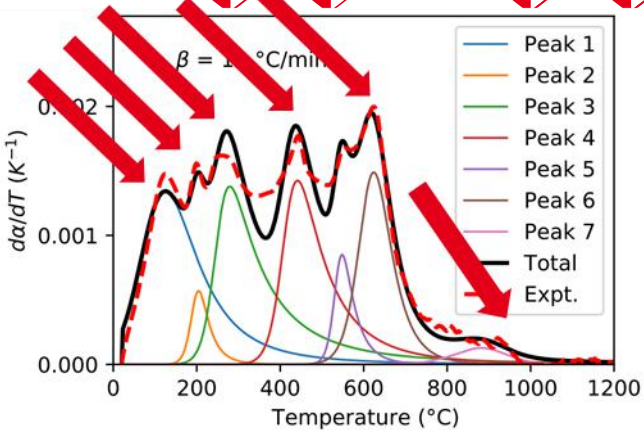


Fritte de verre + déchet séché (~100% de nitrates)

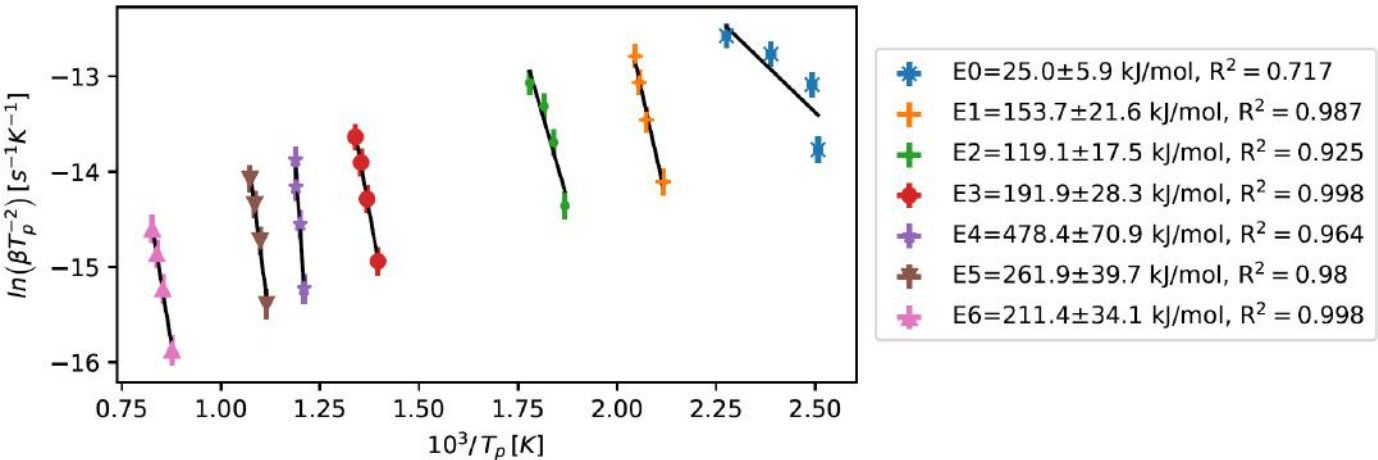
# Détermination de l'énergie d'activation par la méthode de Kissinger

$$\frac{E_i}{R} = - \frac{d \left( \ln \left( \frac{\beta}{T_p^2} \right) \right)}{d \left( \frac{1}{T_p} \right)}$$

Tp : Température du pic  
β : Rampe de montée en température  
R : Loi universelle des gaz parfait  
E<sub>i</sub> : Energie d'activation de la décomposition des nitrates



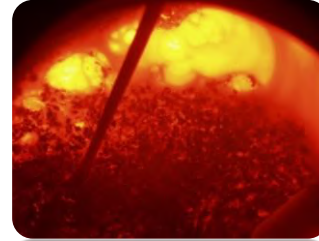
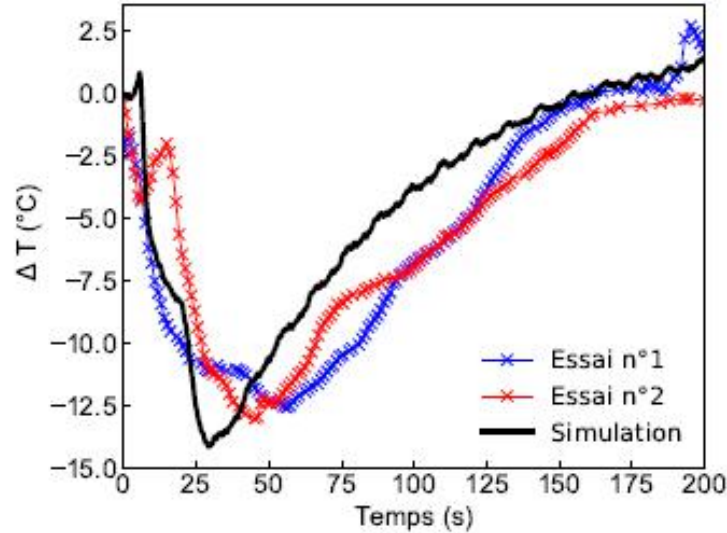
Fritte de verre + Calcinat (~20% de nitrates)



Fritte de verre + Déchet séché (~100% de nitrates)

# Simulation multiphysiques de l'élaboration des verres radioactifs

→ Validation et transition du modèle au creuset froid



Application  
au creuset  
froid

Comparaison de l'évolution de la température  
simulée (bleu et rouge) et mesurée (noir)

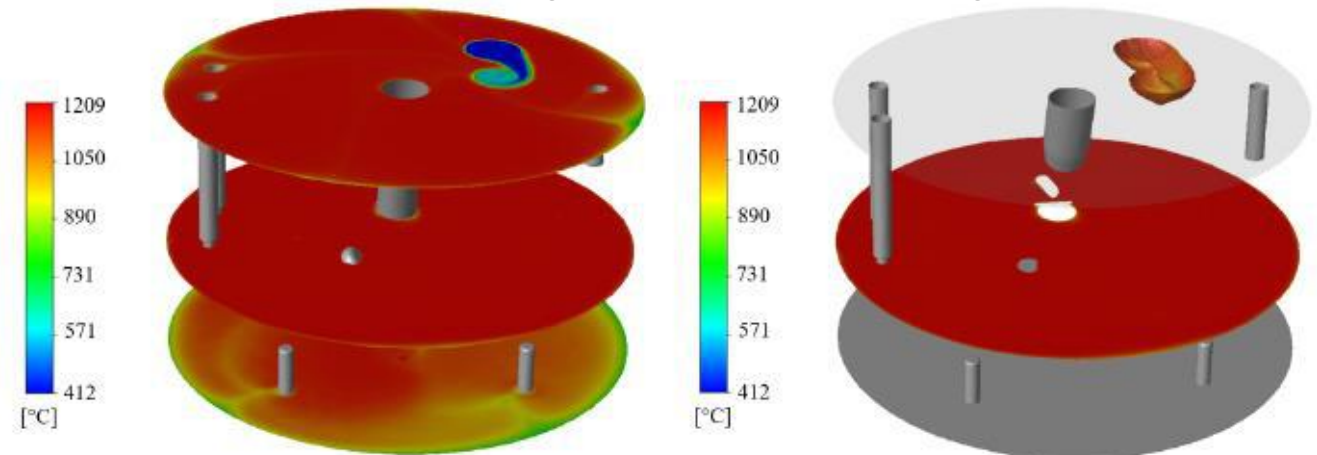
Validation du modèle  
thermique



## Simulation four induction directe : Creuset froid

### Résolution du modèle MTH-Chimie

- ✓ Vitesse d'alimentation du calcinat = 36kg/h
- ✓ Température du calcinat : 450°C
- ✓ Température bain de verre : 1200°C
- ✓ Vitesse d'agitation : 60 Tr/min
- ✓ Charge de verre initiale : 300 kg



Homogénéité thermique

$$P_{\text{alim. } 1200^{\circ}\text{C}} = 16 \text{ kwatt}$$

Front de réaction  
(iso-contour  $\alpha$ )

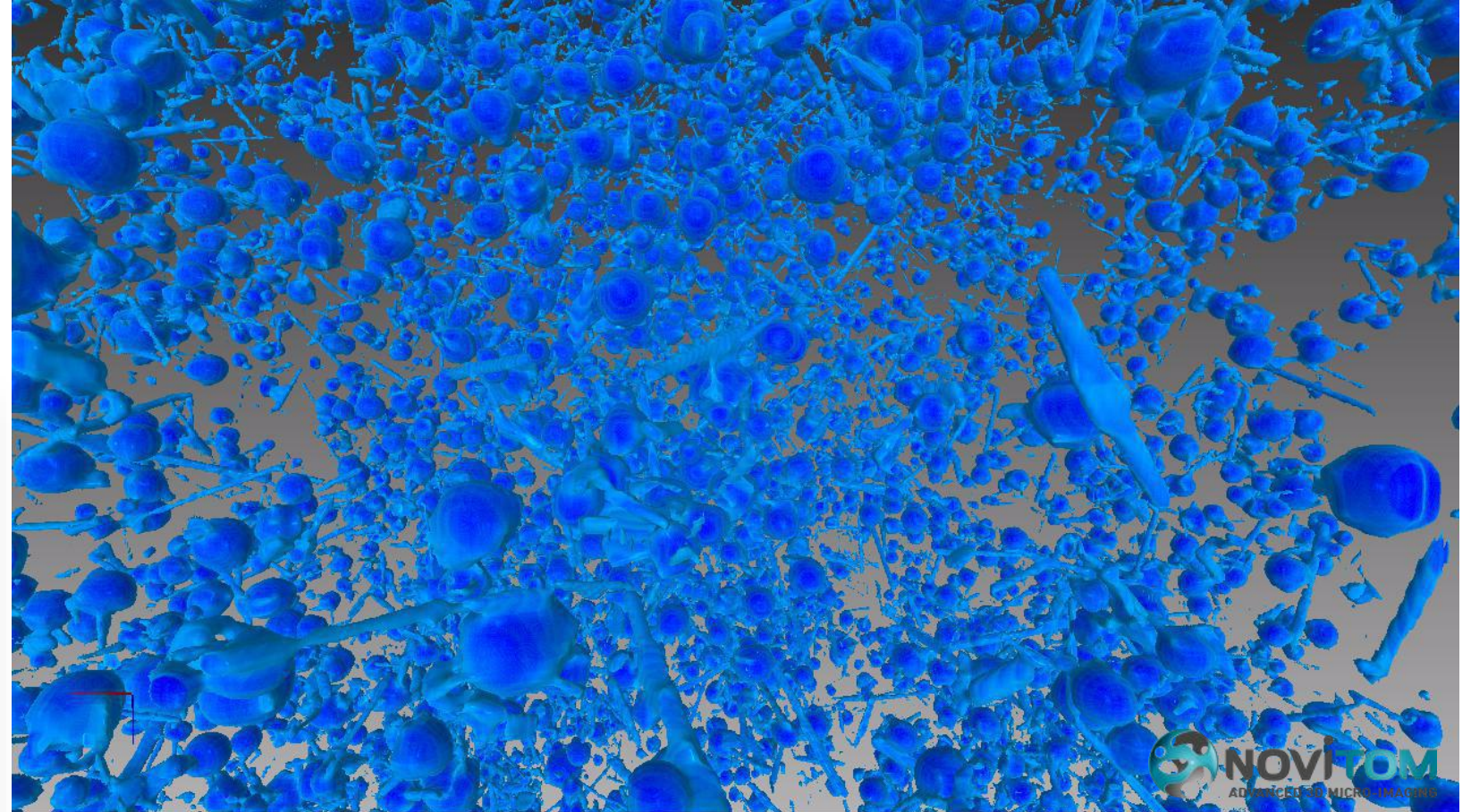
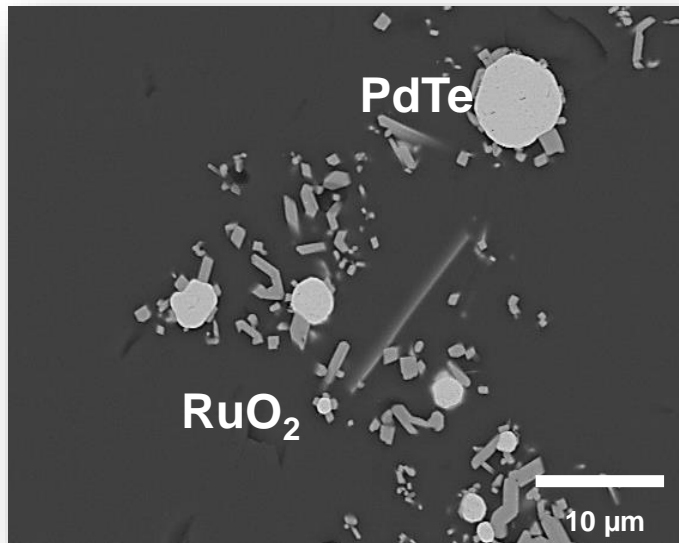
$$P_i \text{ affinage } 1200^{\circ}\text{C} = 163 \text{ kwatt}$$

Faible impact sur la thermique globale du four en  
condition nominale d'exploitation



## 2- Etude de l'influence des métaux nobles (Pd, Ru, Rh) indissous sur le comportement rhéologique des verres actuels (UOx)

Particules sous forme de d'aiguilles de  $\text{RuO}_2$  et de billes de PdTe dispersées dans la matrice vitreuse



X Micro-tomographie (ESRF, ID19)

Echantillon de verre contenant 10% massique de PdTe,  $\text{RuO}_2$  (diamètre des sphères  $\sim 5 \mu\text{m}$ ) taille des Voxel  $0,16^3 \mu\text{m}^3$



# Etude de l'influence de la concentration en platinoïdes ( $\text{RuO}_2$ , $\text{PdTe}$ ) sur la viscosité

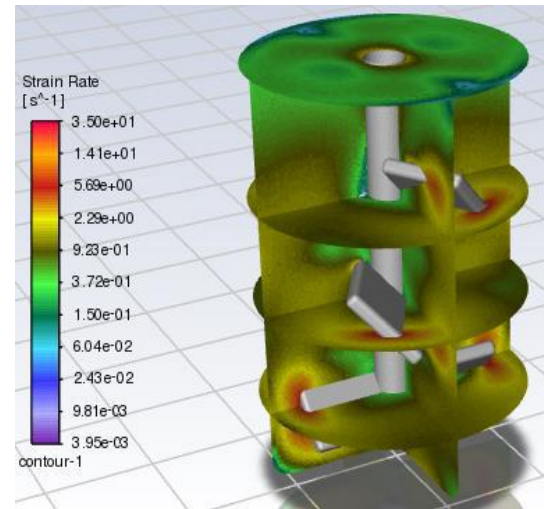
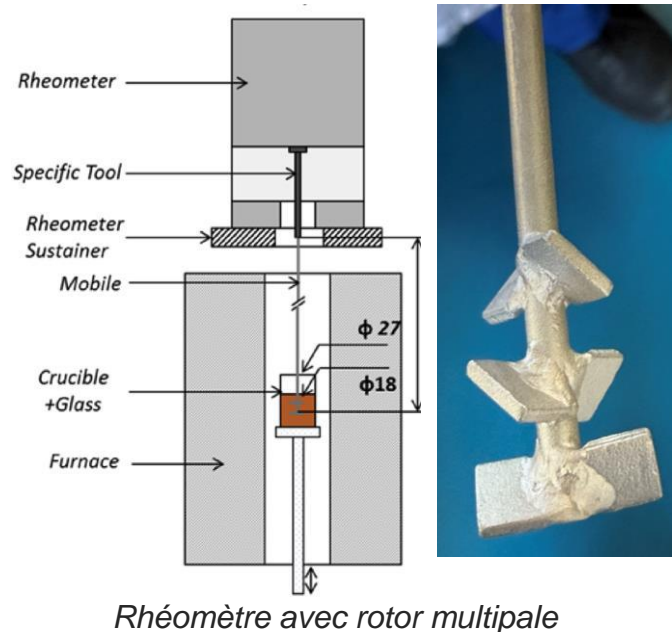
$T = 1200^\circ\text{C}$

## Comportement non newtonien du verre contenant des platinoïdes

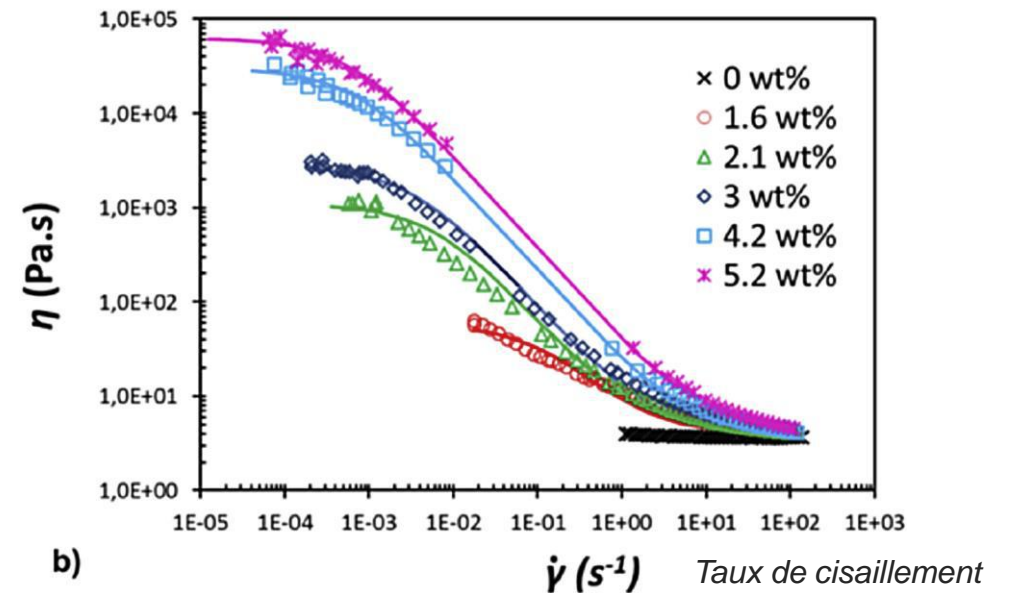
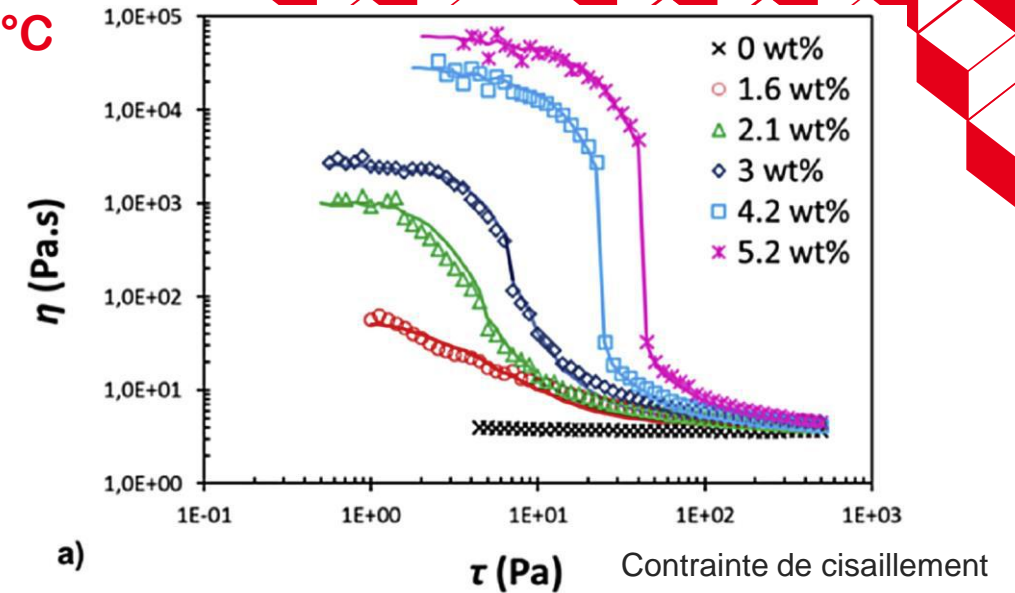
Le modèle de Vogel-Fulcher-Tammann (VFT)

$$\log \eta(T) = A + \frac{B}{T - T_0}$$

classiquement utilisé ne permet pas de prendre en compte l'influence des platinoïdes



Simulation thèse Dorian Beslay  
2025

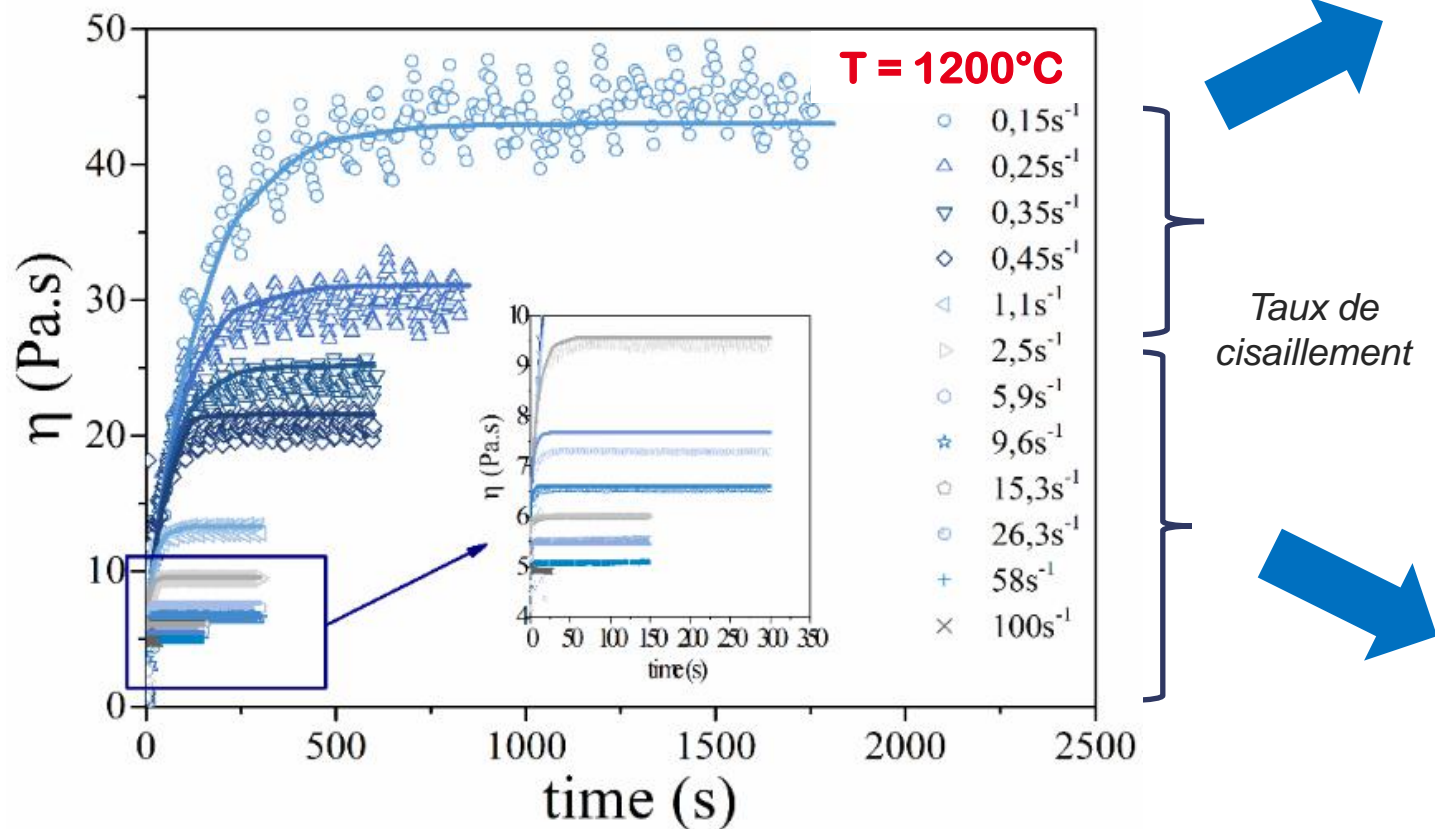


J. Puig, C. Hanotin, M. Neyret, P. Marchal, High temperature rheological study of borosilicate glasses containing platinum group metal particles by means of a mixer-type rheometer, Journal of Nuclear Materials 2016

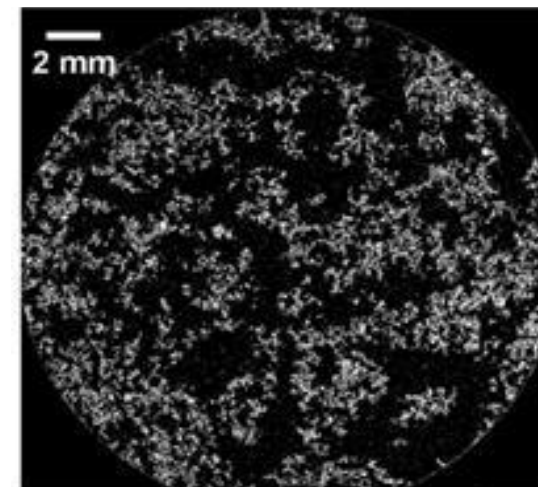
# Etude de l'influence du regroupement des particules de $\text{RuO}_2$ sur la viscosité

Mise en évidence du comportement thixotropique du verre : Viscosité =  $f(t)$  dépendant du taux de structuration du  $\text{RuO}_2$  ( $\lambda$ )

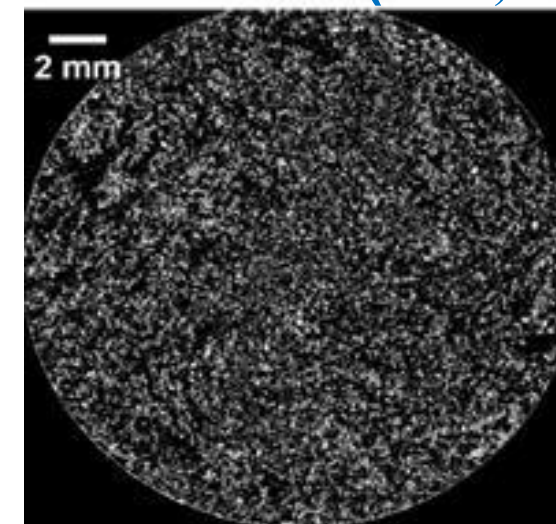
4,2 % massique  $\text{RuO}_2$



Particules de  $\text{RuO}_2$  complètement structurées ( $\lambda = 1$ )



Particules de  $\text{RuO}_2$  complètement déstructurées ( $\lambda = 0$ )



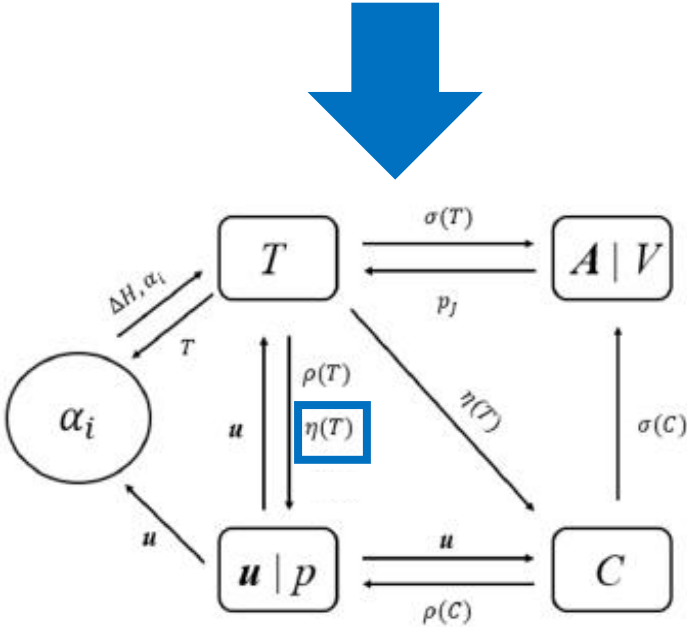


# Prise en compte du comportement thixotropique des platinoïdes dans le modèle CFD

$$\eta = \eta_{\infty} + \lambda K_0 \dot{\gamma}^{\alpha-1}$$
$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + u_i \frac{\partial \lambda}{\partial x_i} = a(1 - \lambda) - b\lambda \dot{\gamma}$$

Modèle de Houska

$\lambda$  : Taux de structuration

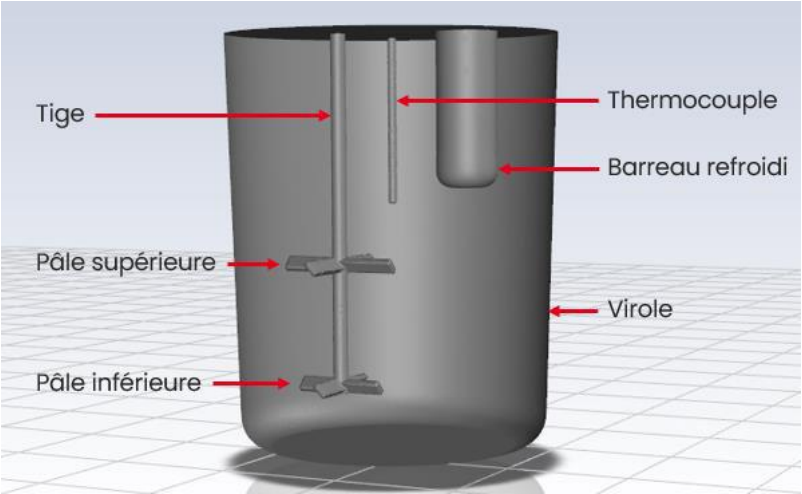


Modification de la loi de viscosité dans le modèle CFD



# Prise en compte du comportement thixotropique des platinoïdes dans le modèle CFD

Simulation de la refusion d'un verre dans une maquette permettant de reproduire la dynamique des fluides au sein d'un creuset froid



Le comportement thixotropique du verre affecte fortement la viscosité apparente dans le four agité à faible vitesse

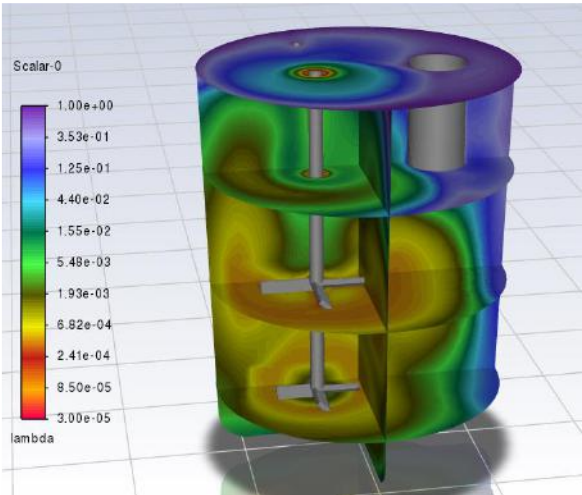
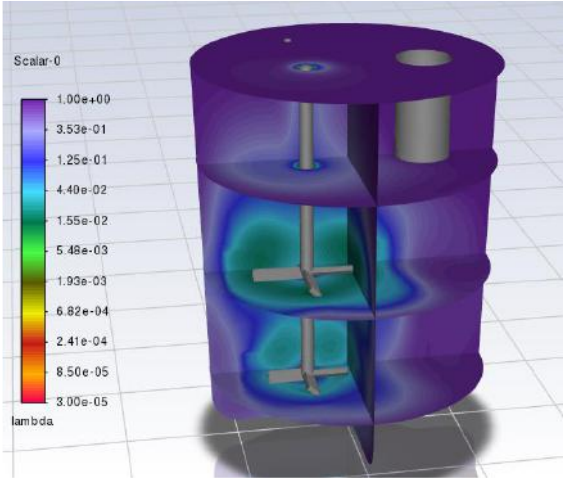


Nécessité d'optimiser les paramètres d'agitation, les concentrations en métaux nobles

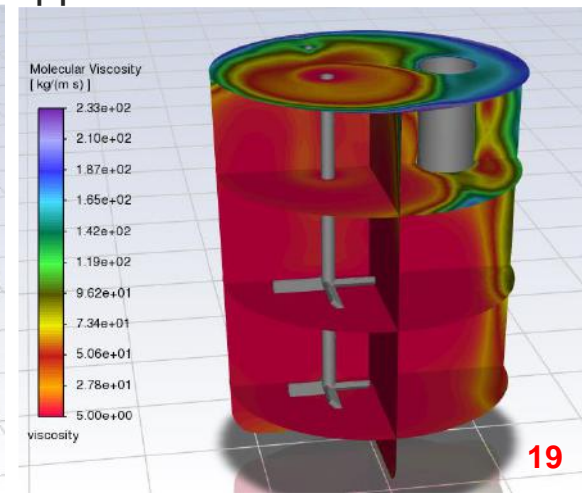
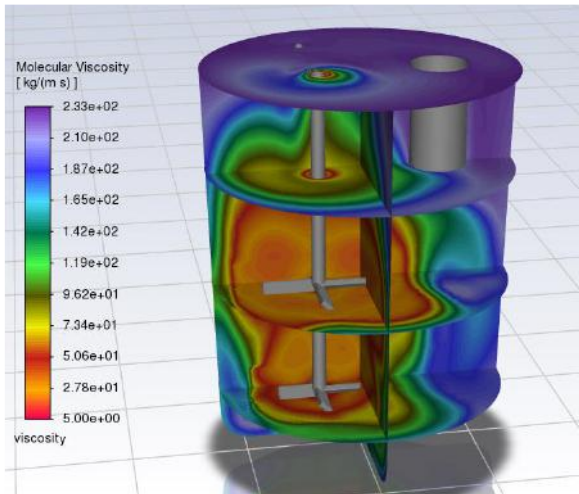
5 tr/min

500 tr/min

Taux de structuration  $\lambda$



Viscosité apparente



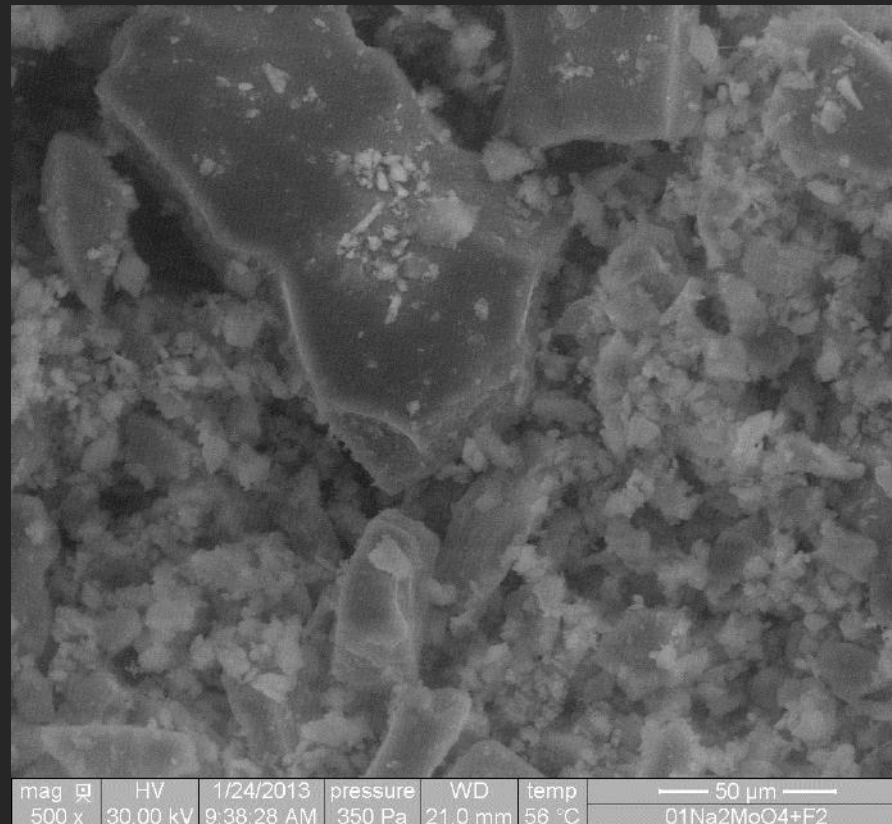
Submitted [Beslay 2025]

# R&D élaboration des verres à haut taux de charge en creuset froid

→ Etude des cinétiques de cristallisation et de séparation de phase ainsi que leur influence sur les propriétés physico-chimiques des verres



*Verre borosilicate enrichi en  $\text{MoO}_3$*



Augmentation des  
taux de charge en  
déchets



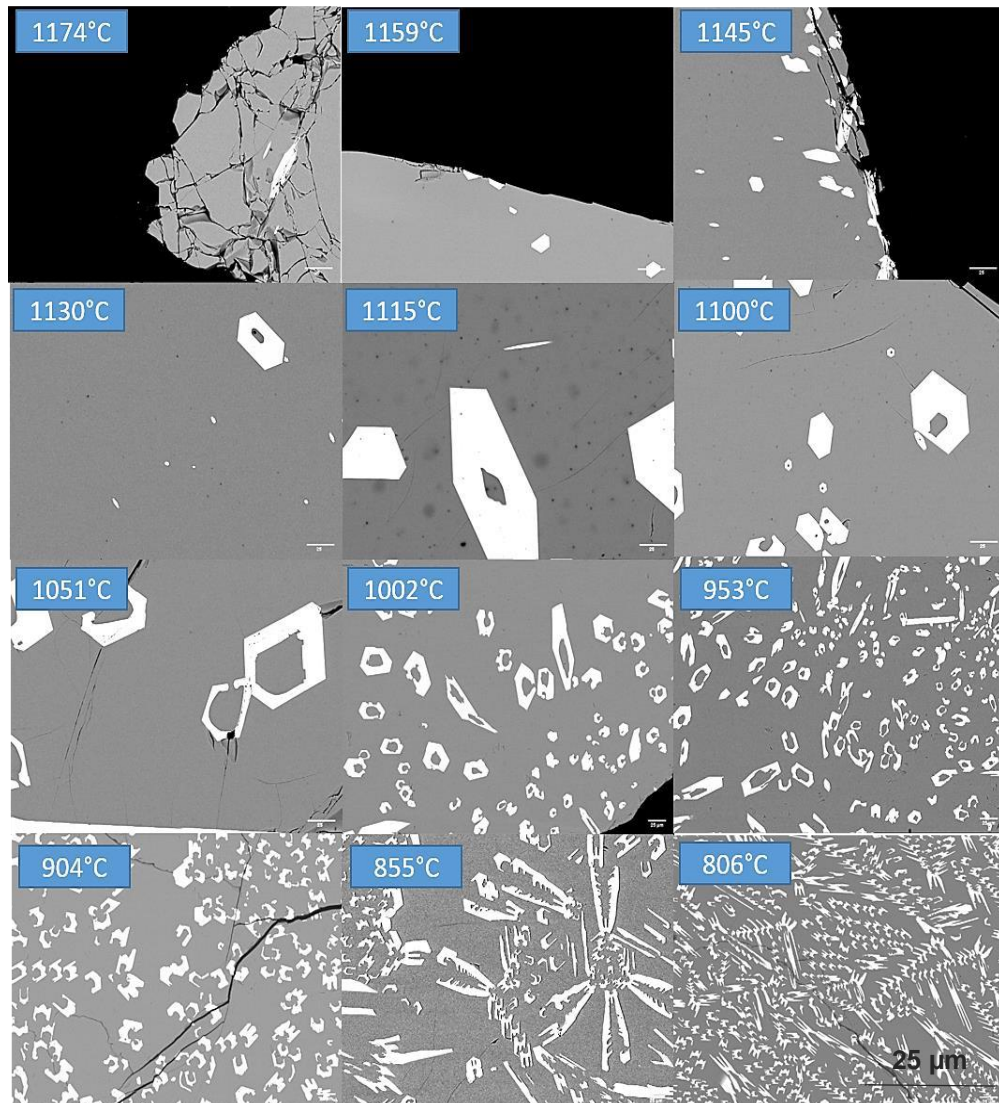
Augmentation des  
teneurs en terres  
rares, actinides, Mo,  
(Cr) ,...

*Verre borosilicate enrichi en  $\text{Nd}_2\text{O}_3$*



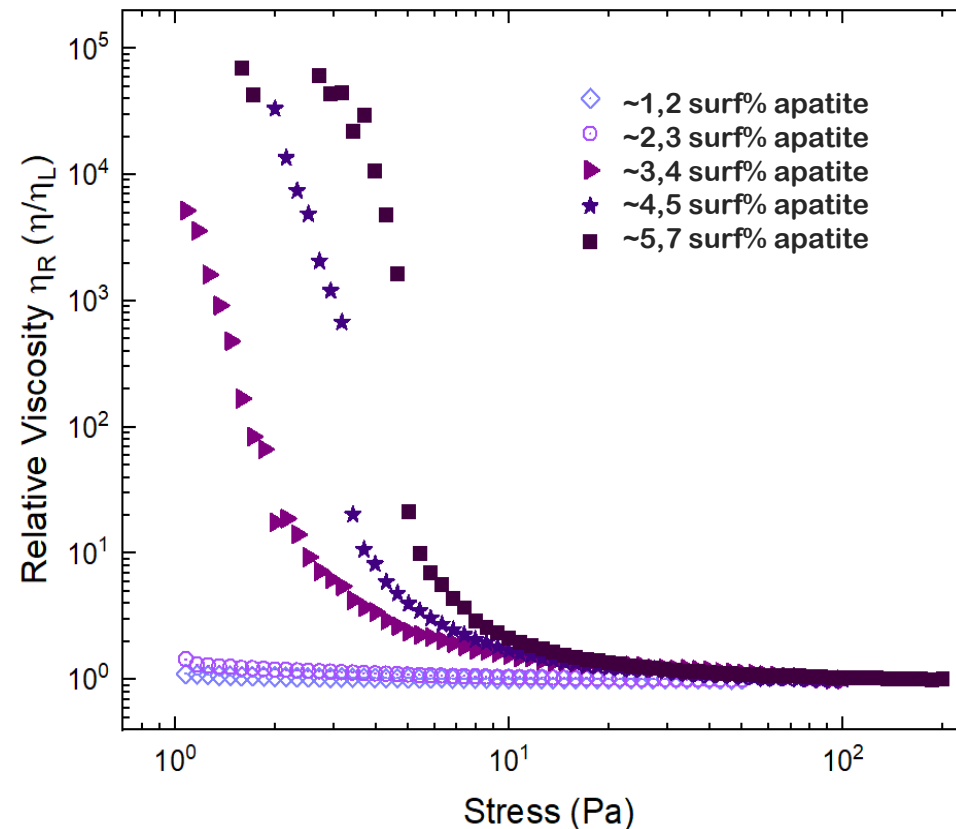


# Etude de la modification du comportement rhéologique des verres partiellement cristallisés : Cas de $51\text{SiO}_2\text{-}17\text{B}_2\text{O}_3\text{-}17\text{Na}_2\text{O-}8\text{Nd}_2\text{O}_3\text{-}7\text{CaO}$

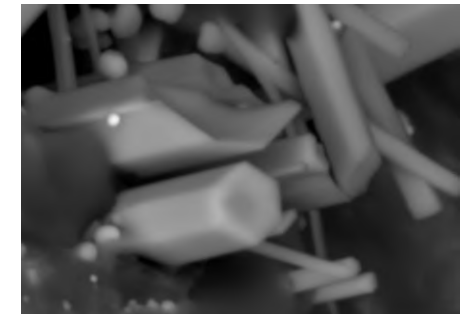


Evolution de la morphologie des silicates de terres rares en fonction de la température

La viscosité devient non newtonienne entre 2,3 et 3,4 % surfacique de cristaux de  $\text{Ca}_2\text{Nd}_8(\text{SiO}_4)_6\text{O}_2$



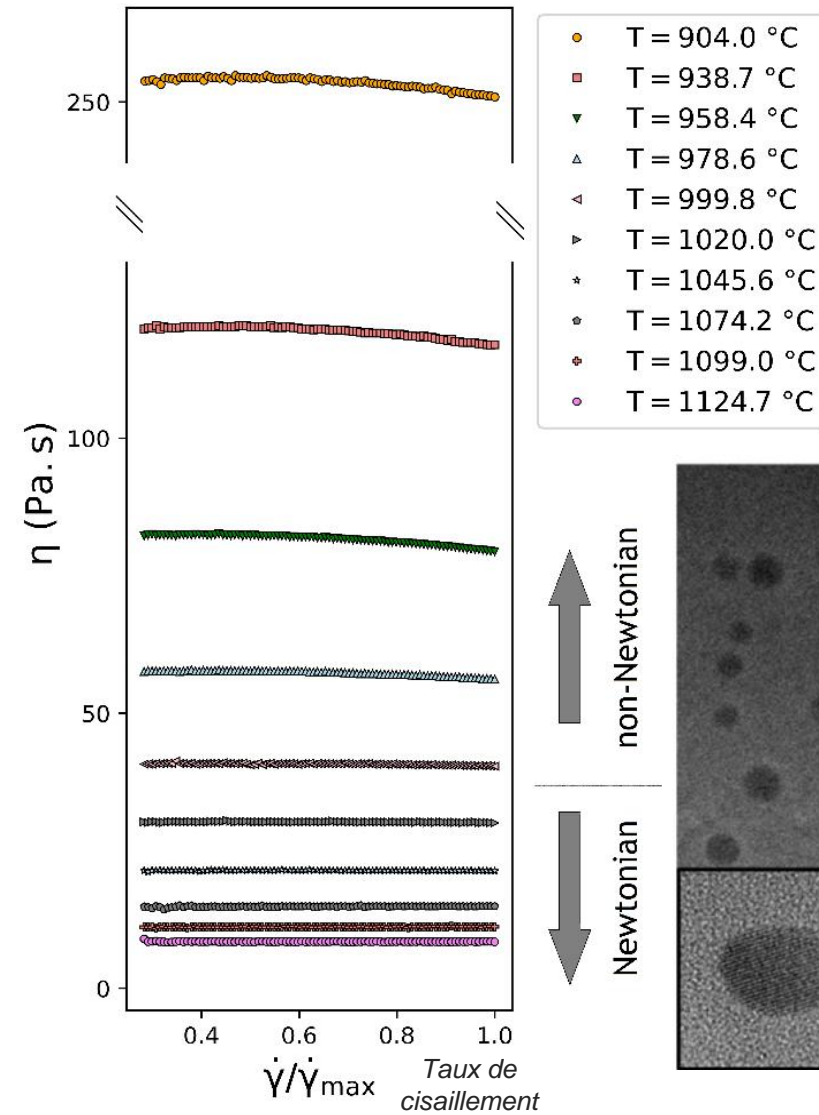
- Viscosité liquide résiduel peu modifiée
- Fort encombrement stérique des SiTr



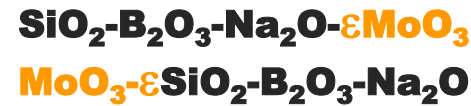
Travaux en cours : Thèse Théo Pitarch (2024-2027), Elise Regnier

J. Jiusti, E. Regnier, V. Malivert, ML. Ghazzai, E. Brackx, M. Neyret, E. Sauvage, F. Faure, P. Marchal, "Crystallization and rheological study of a Nd-oxyapatite-bearing melt", submitted to JNCS (2024)

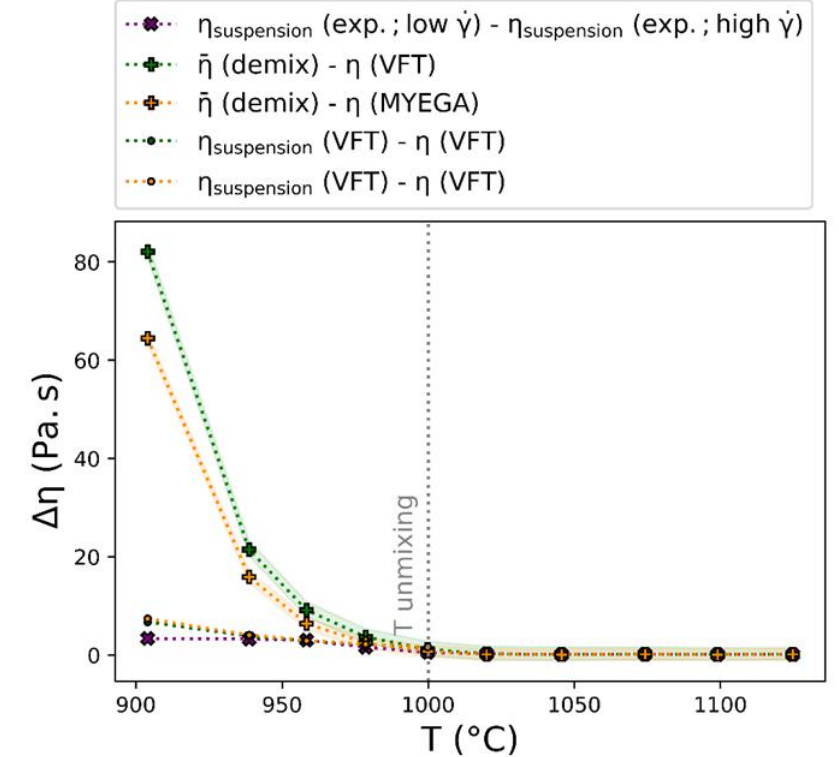
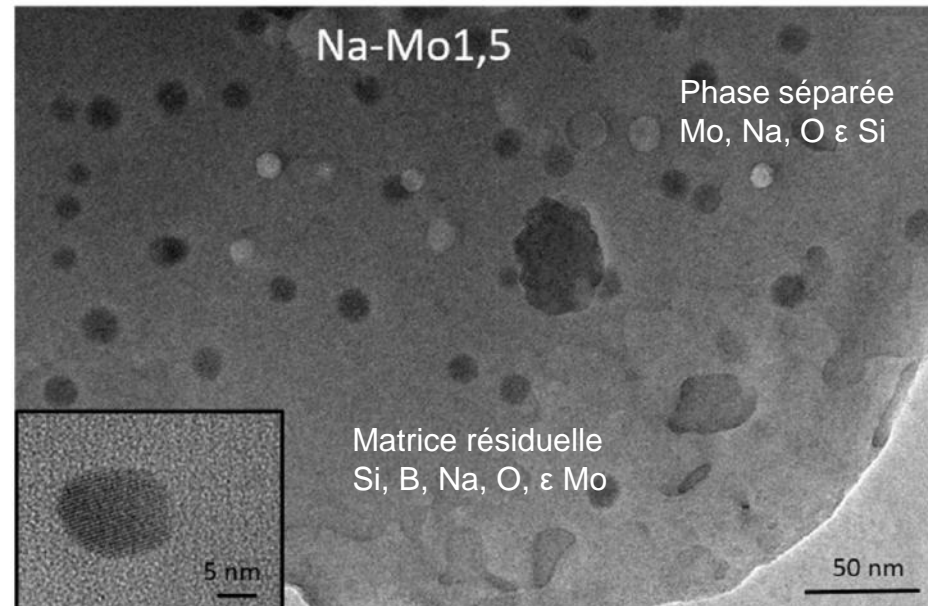
# Etude du comportement rhéologique des verres contenant des phases séparées : Cas de $63\text{SiO}_2\text{-}17\text{B}_2\text{O}_3\text{-}19\text{Na}_2\text{O-}1,5\text{MoO}_3$ contenant des molybdates alcalins



Modification du comportement rhéologique associée à la séparation de phase liquide-liquide



**T°C séparation de phase = 1000°C**



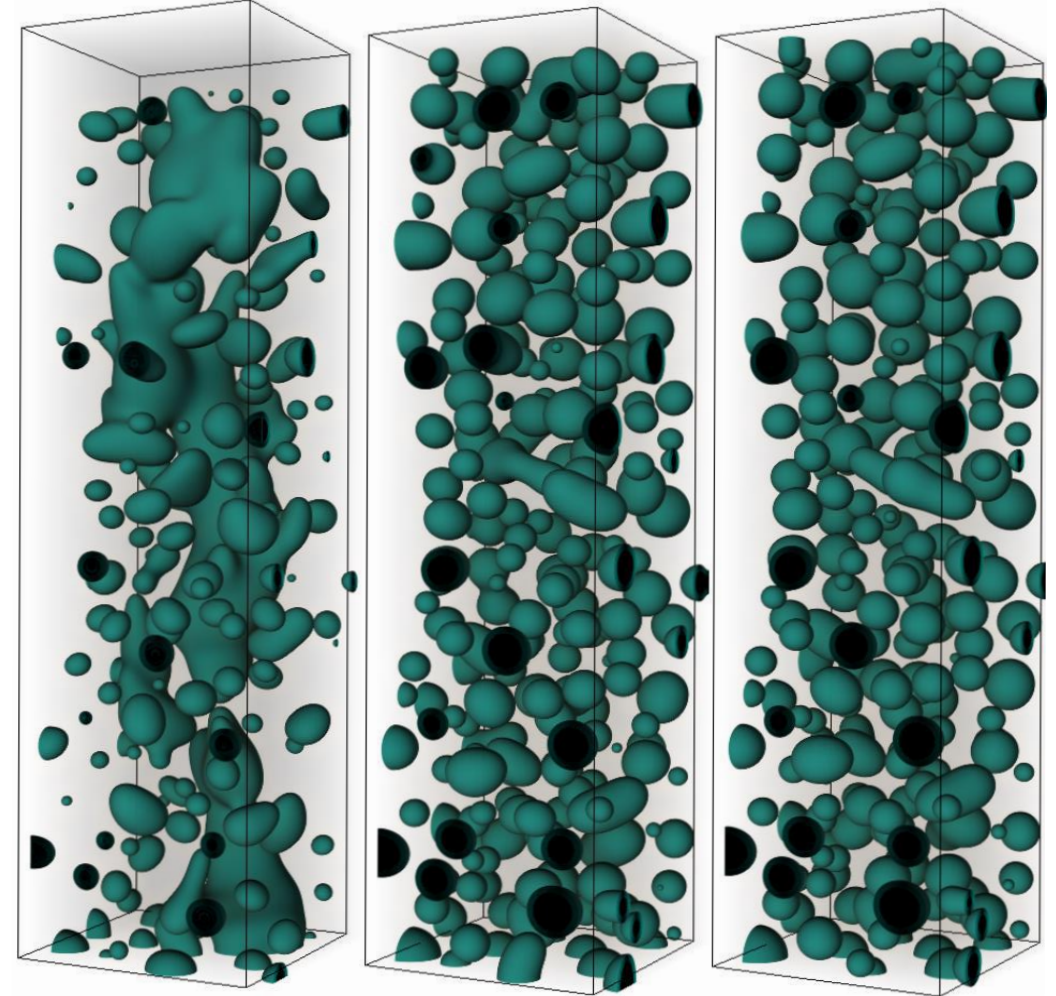
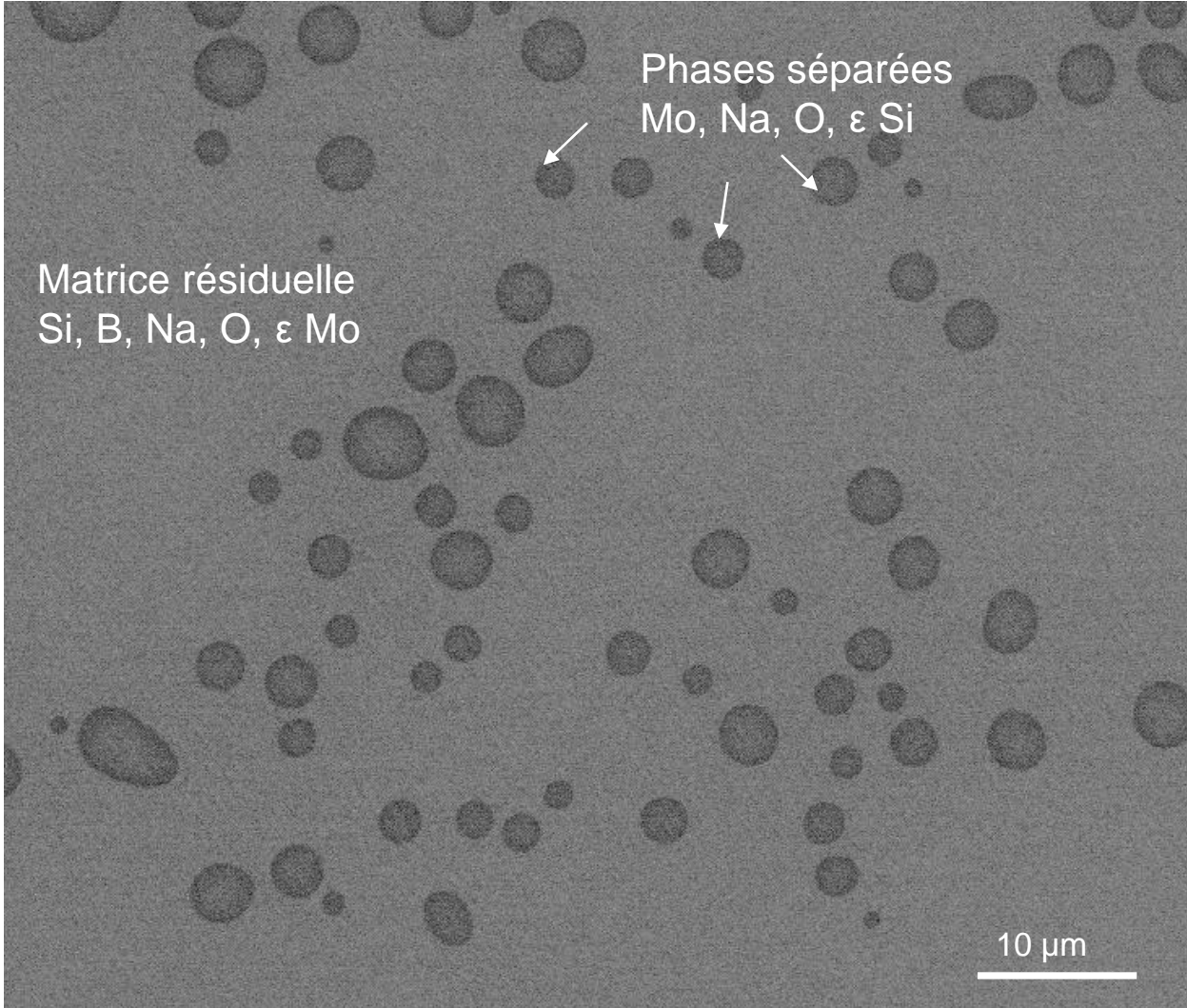
- Augmentation de la viscosité associée à la modification de la composition de la matrice résiduelle
- Appauvrissement en sodium dû à la formation des unités  $2\text{Na}^+$ ,  $\text{MoO}_4^{2-}$
- Polymérisation du réseau silicaté
- Diminution des  $\text{BO}_4^-$



# Description de la cinétique de séparation de phase liquide-liquide obtenue par nucléation croissance de verres enrichis en $\text{MoO}_3$

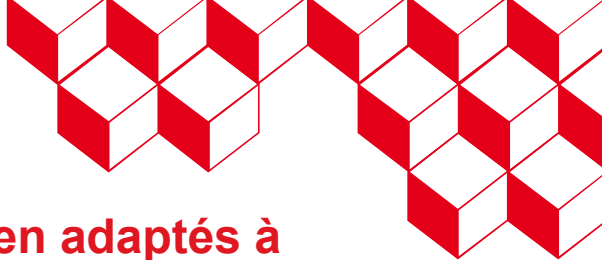
Image MEBE réalisée à 725 °C

Verre  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-1,8MoO}_3$



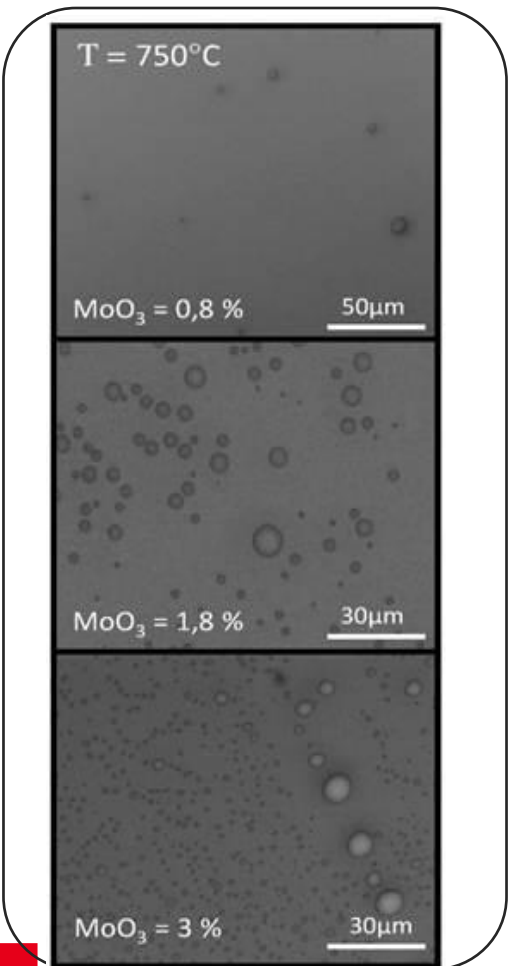


# Développement d'un modèle à champ de phase pour prédire la cinétique de séparation de phase liquide-liquide de verres enrichis en $\text{MoO}_3$



## Phénoménologie de la separation de phase<sup>1</sup>

Nucléation  
croissance

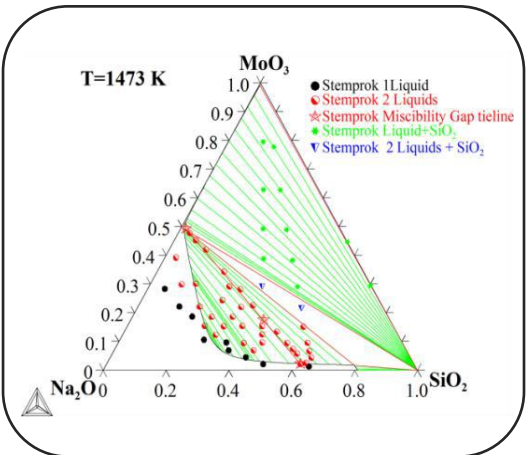


→ Les modèles à champ de phase sont bien adaptés à la description de la séparation de phase

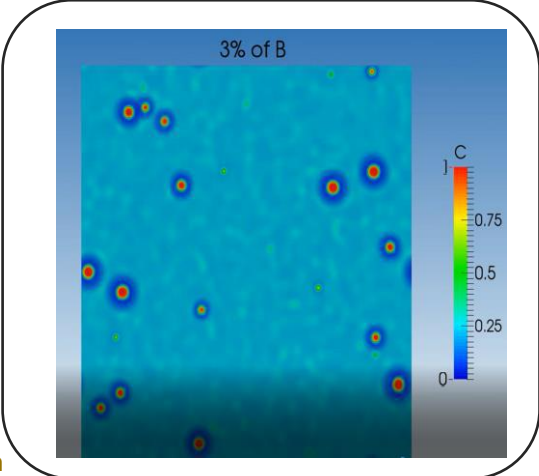
Grand potentiel à champ de phase <sup>4</sup>  
Couplé aux équations de Navier-Stokes

Open CALPHAD

Base de donnée thermodynamique méthode CALPHAD  
 $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-MoO}_3$  <sup>2</sup>



Résolution mathématique Lattice Boltzmann <sup>3</sup>



<sup>2</sup> Thèse Sébastien Bordier, Université Aix-Marseille University, 2015

HPC LBM\_saclay<sup>3</sup>

<sup>4</sup> Mathis Plapp. "Unified derivation of phase-field models for alloy solidification from a grand potential functional." In: Phys. Rev 2011

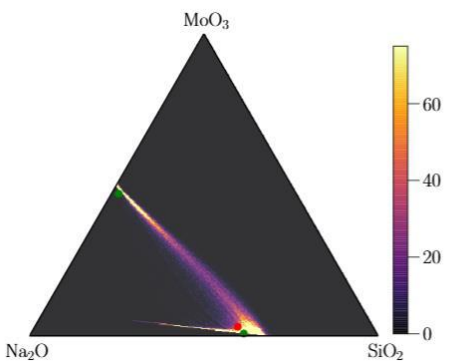


<sup>1</sup> S. Schuller: Chap4 - From glass to crystal - Nucleation, growth and phase separation: from research to applications 2017

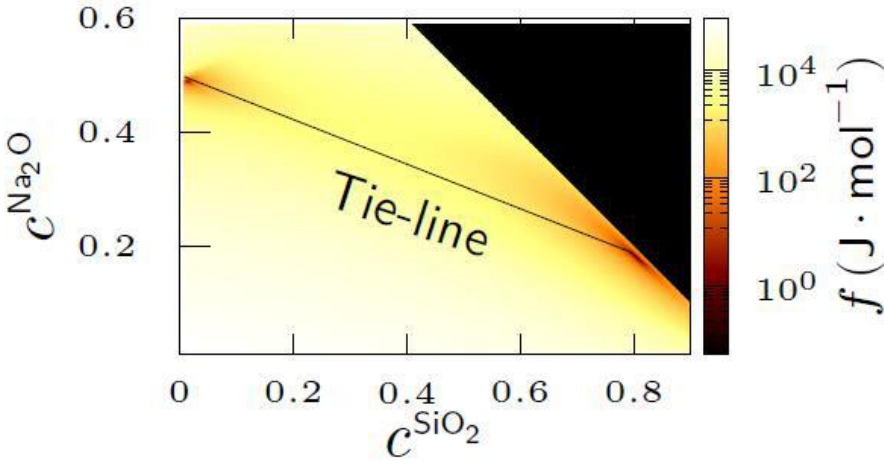
# Couplage de la thermodynamique au modèle à champ de phase



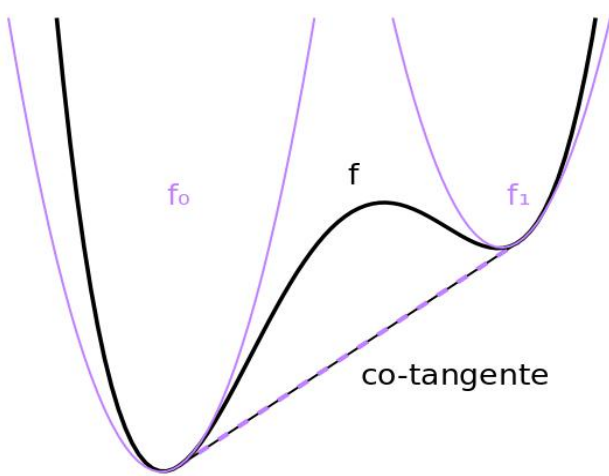
## Paysage thermodynamique



T°= 1152°C



L'énergie de Gibbs associé à un double puits de potentiel est ajustée avec 2 fonctions hyperboliques (f0, f1) autour de chaque minimum



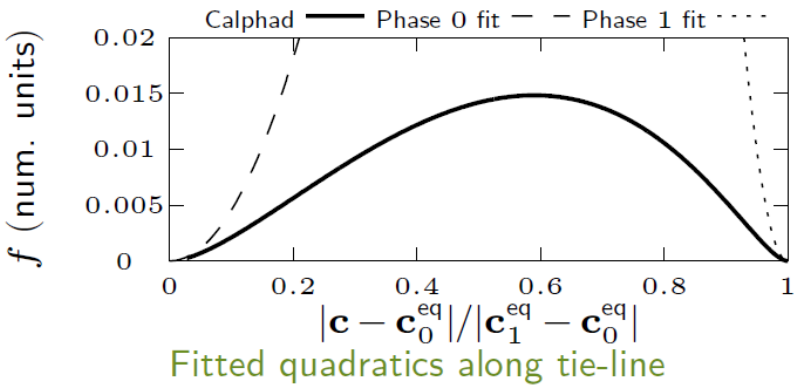
## Fonctions

$$f_i(\mathbf{c}) = \frac{1}{2} \mathbf{K}_i : (\mathbf{c} - \mathbf{c}_i^{\text{eq}})(\mathbf{c} - \mathbf{c}_i^{\text{eq}})^T$$

## Détermination des paramètres d'ajustage

➔  $\omega_i(\boldsymbol{\mu}) = -\frac{1}{2} \mathbf{K}_i^{-1} : \boldsymbol{\mu} \boldsymbol{\mu}^T - \mathbf{c}_i^{\text{eq}} \cdot \boldsymbol{\mu}, \quad \boldsymbol{\mu} = \mathbf{K}(\varphi)(\mathbf{c} - \mathbf{c}^{\text{eq}}(\varphi))$

- $\mathbf{K}_i$  : Matrice de courbure liée à la dérivée seconde de f
- $\boldsymbol{\mu}$  : Potentiel chimique local
- $\varphi$  : Variable de phase
- $\mathbf{K}(\varphi)$  et  $\mathbf{c}^{\text{eq}}(\varphi)$  interpolent les paramètres entre les deux phases



# Modèle couplé aux équations de Navier-Stokes

## Fonction Grand-potential dérivé des équations de Cahn Hilliard et Allen-Cahn

$$\partial_t \varphi + \underbrace{\mathbf{u} \cdot \nabla \varphi}_{\text{Advection term}} = \underbrace{M_\varphi \nabla^2 \varphi}_{\text{Diffusive term}} - \frac{\lambda M_\varphi}{4W^2} \underbrace{\varphi(1-\varphi)(1/2-\varphi)}_{\text{Derivative of double-well}} - \frac{\lambda M_\varphi}{W^2} \underbrace{6\varphi(1-\varphi)(\omega_0(\mu) - \omega_1(\mu))}_{\text{Thermodynamic driving term}}$$

| Symbole      | English   |
|--------------|---|
| $\varphi$    | Phase-field – phase index between the liquid phases 0 and 1         |
| $M_\varphi$  | Mobility coefficient  |
| $\lambda$    | Thermodynamical coefficient of coupling                             |
| $W$          | Interface width   |
| $\omega_0$   | grand potential density of the first liquid phase)                  |
| $\omega_1$   | grand potential density of the second liquid phase                  |
| $\mathbf{u}$ | mean fluid velocity ( $\mathbf{u}$ is computed by the NS equations) |

## Gradient de composition phase A and B

for  $\alpha = A, B$

$$\partial_t c^\alpha + \underbrace{\mathbf{u} \cdot \nabla c^\alpha}_{\text{Advection term}} = \underbrace{\nabla \cdot (M^\alpha \nabla \mu^\alpha)}_{\text{Diffusive term}}$$

| Symbol  | Description                  |
|---------|------------------------------|
| $c^A$   | : composition of A           |
| $c^B$   | : composition of B           |
| $M^A$   | : diffusion coefficient of A |
| $M^B$   | : diffusion coefficient of B |
| $\mu^A$ | : chemical potential of A    |
| $\mu^B$ | : chemical potential of B    |





## Equation de Navier-Stokes

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

$$\rho \partial_t \mathbf{u} + \rho \nabla \cdot (\mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \underbrace{\rho \nabla \cdot [\nu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T)]}_{\text{Viscous stress tensor}} + \underbrace{\mu_\varphi \nabla \varphi}_{\text{Surface tension}}$$

---

| Symbol | : Description |
|--------|---------------|
|--------|---------------|

|              |                  |
|--------------|------------------|
| $\mathbf{u}$ | : fluid velocity |
|--------------|------------------|

|        |   |
|--------|---|
| $\rho$ | : fluid density (interpolation of $\rho_A$ and $\rho_B$ ) |
|--------|---|

|     |            |
|-----|------------|
| $p$ | : pressure |
|-----|------------|

|       |   |
|-------|---|
| $\nu$ | : fluid viscosity (interpolation of $\nu_A$ and $\nu_B$ ) |
|-------|---|

|               |  |
|---------------|--|
| $\mu_\varphi$ | : chemical potential of interface (depends on surface tension and curvature) |
|---------------|--|

---



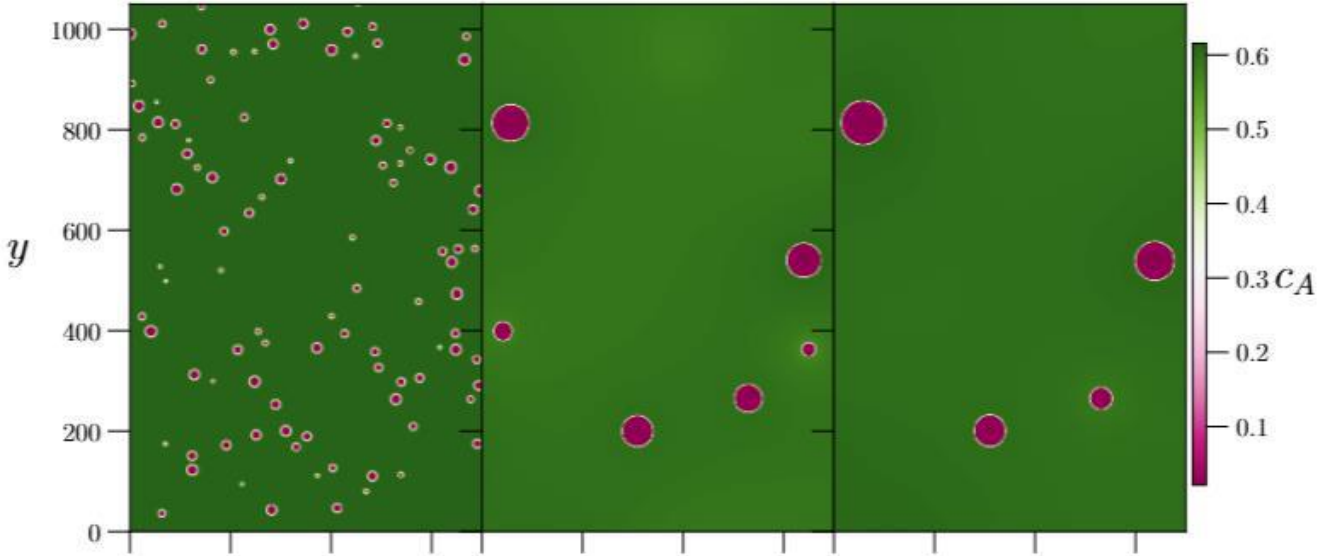
Résolution mathématique Lattice  
Boltzmann



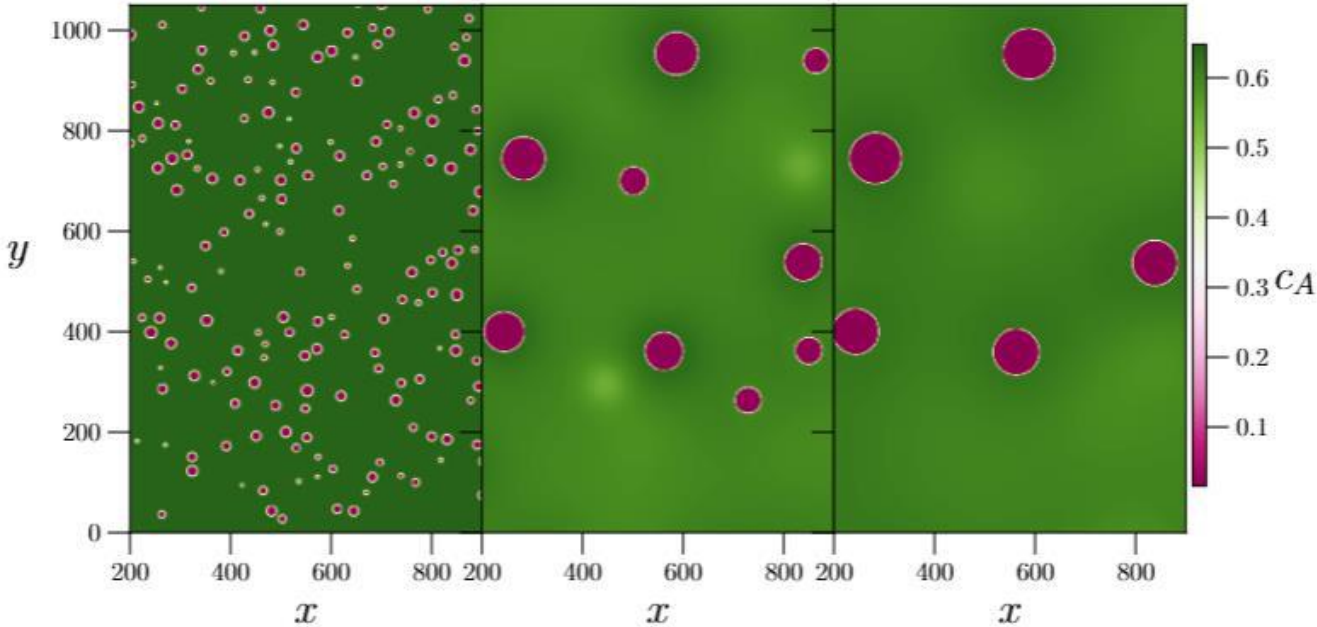
Résultats de simulation

# Résultats de simulations

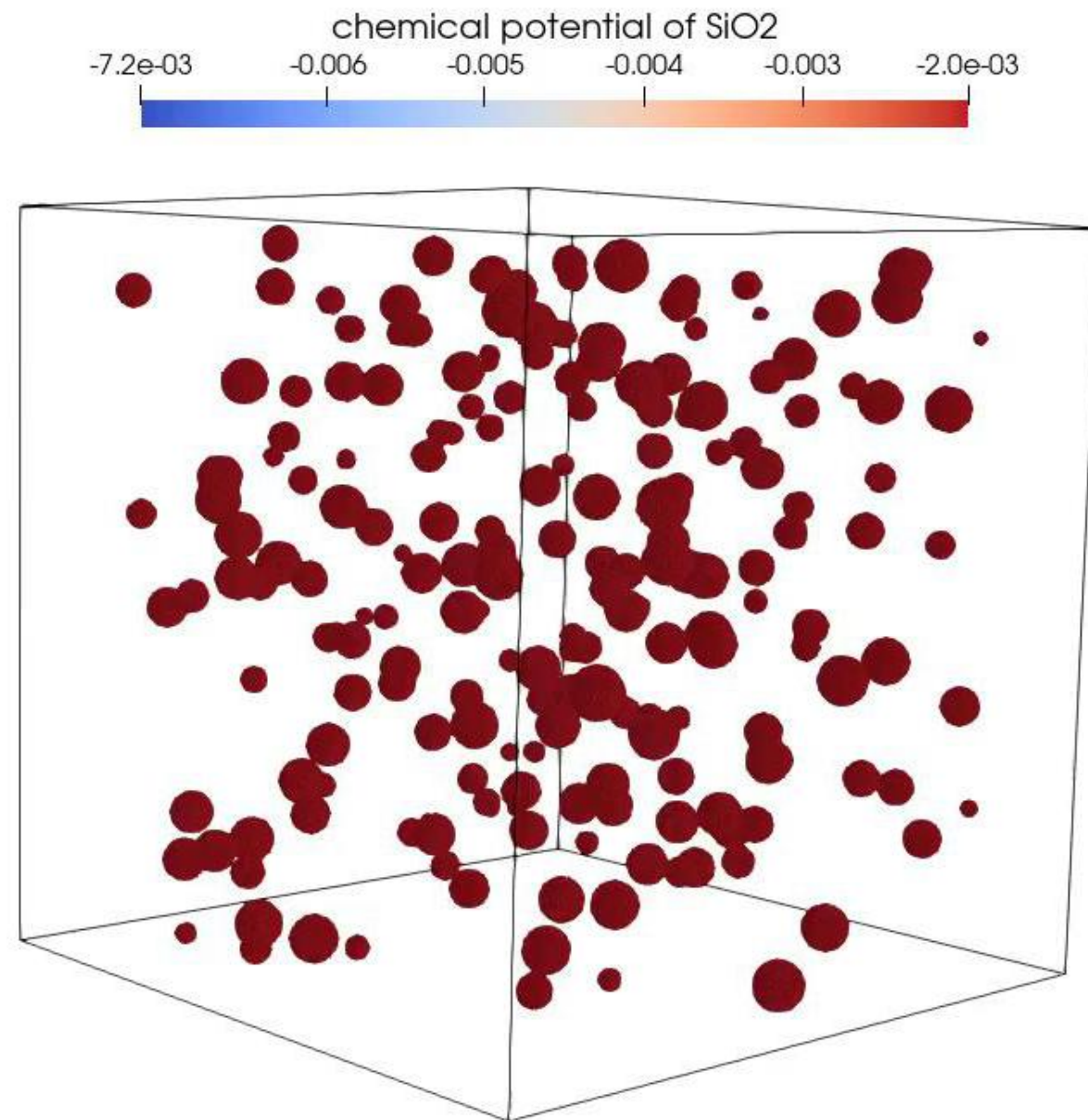
MoO<sub>3</sub> 2%



MoO<sub>3</sub> 3%

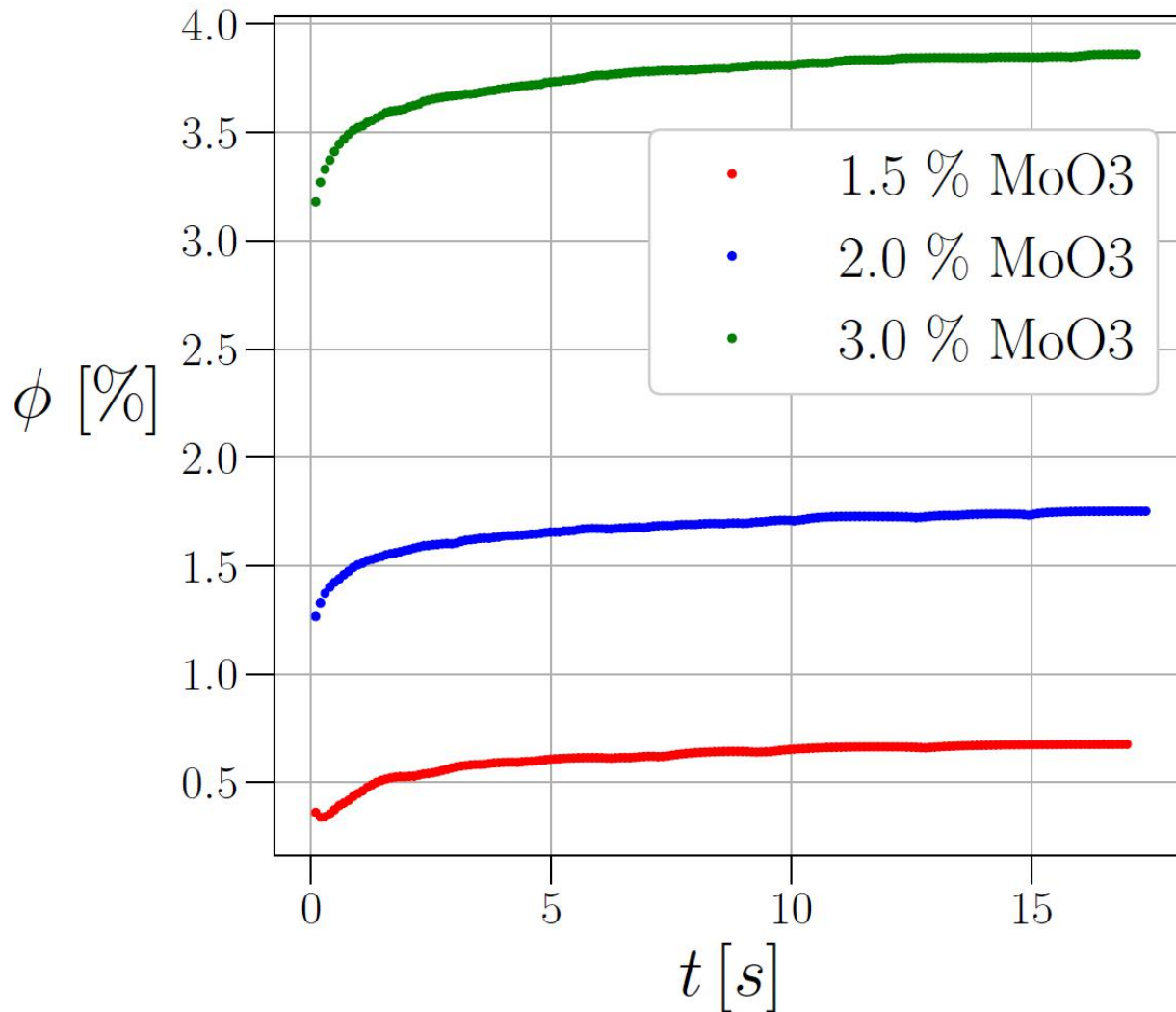


$\text{MoO}_3$  3%

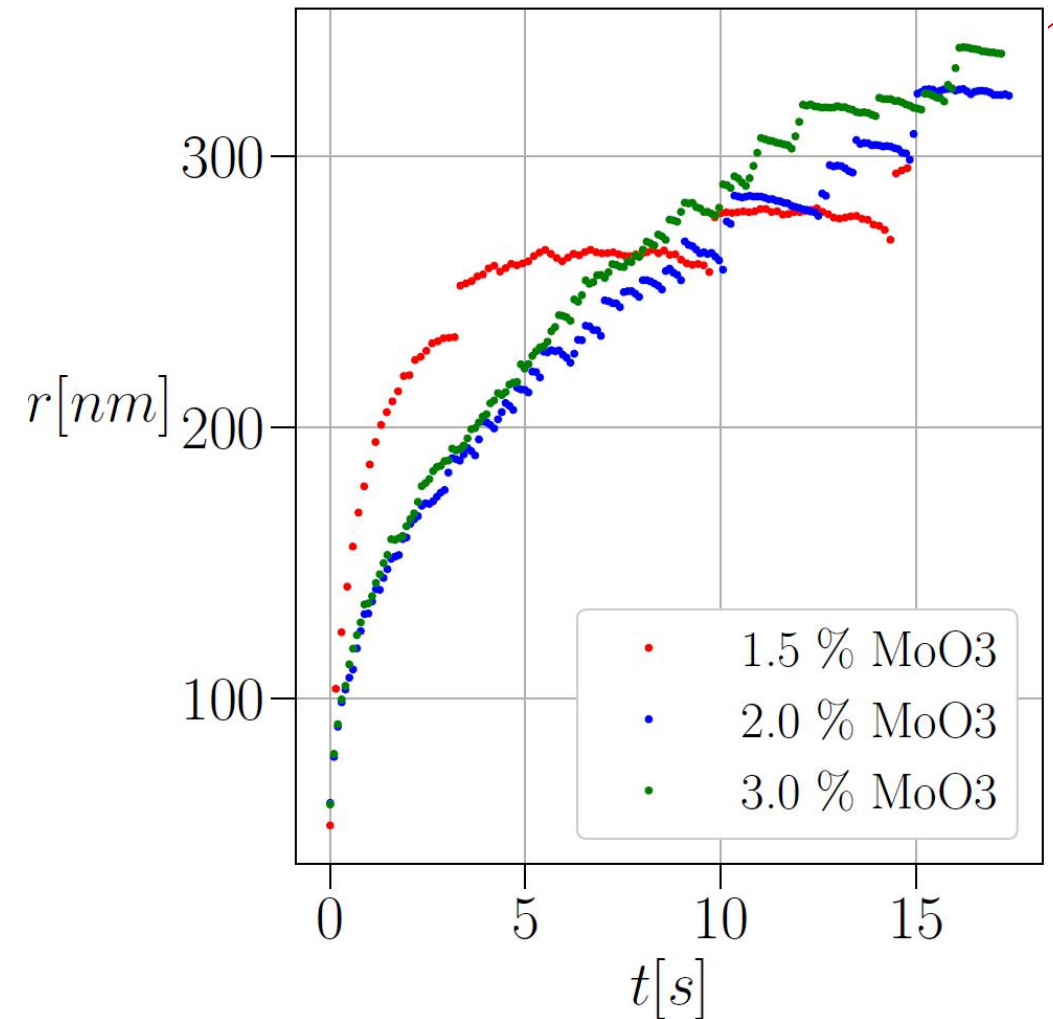




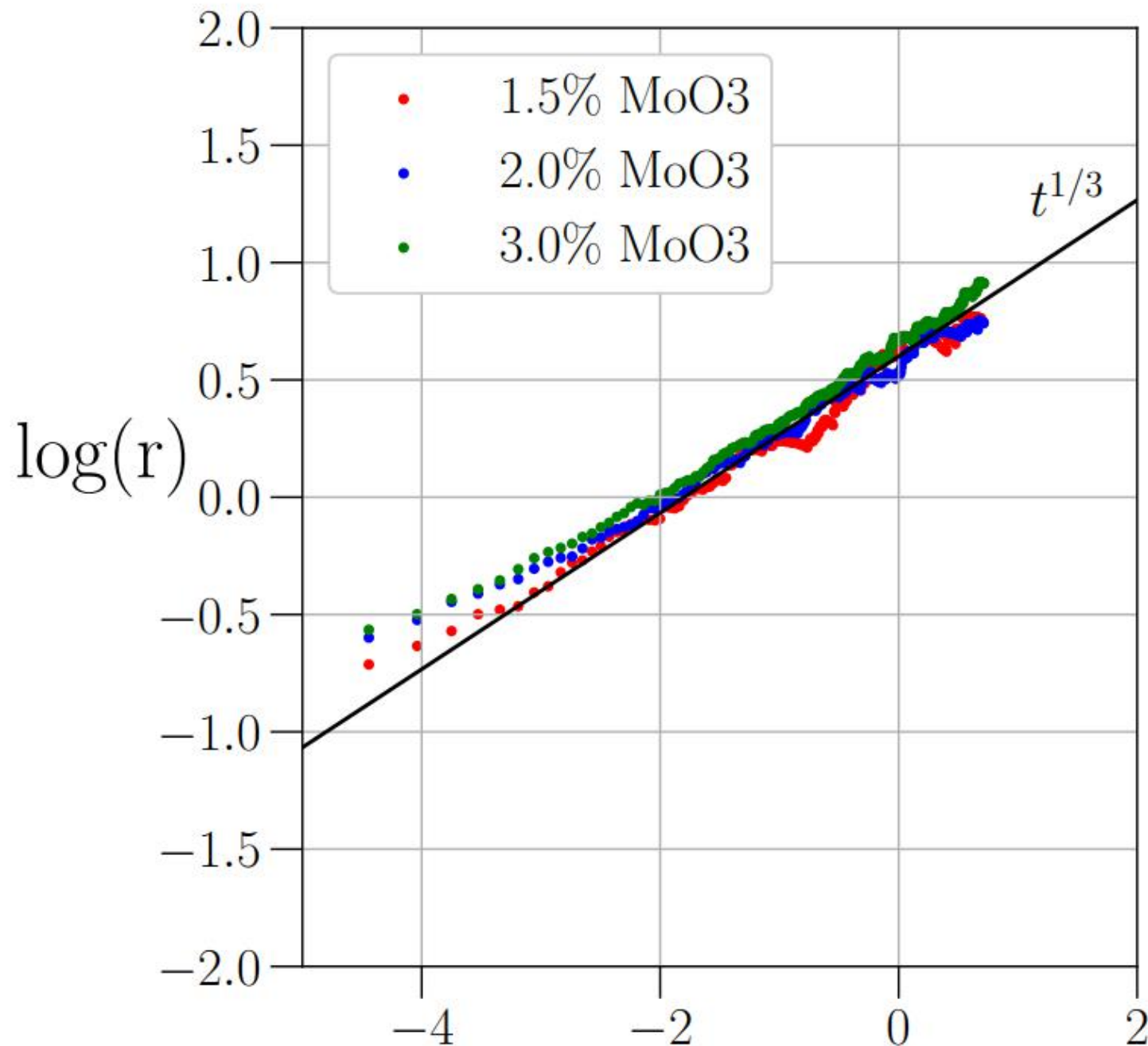
# Quantification des phases séparées



**Quantité de phases en fonction du temps**



**Evolution du rayon en fonction du temps**



**Mécanisme de  
grossissement  
d'Ostwald**

Loi de  
coalescence

$$r = \sqrt[3]{t}$$

# Conclusion

La complexité des systèmes étudiés nécessite :

- Le **développement de nombreuses méthodes expérimentales** permettant de quantifier les paramètres associés aux processus d'élaboration des verres (thermodynamique, cinétique, physico-chimie)
- L'adaptation de modèles existants ou le développement de **nouveaux modèles et techniques de simulation**
- La **transposition** de systèmes simples à des systèmes vitreux multi-composants
- La transposition verres **non radioactifs / verres radioactifs**

## Approches de R&D intégrées du laboratoire jusqu'au soutien aux industriels



Posters Maxime de Araujo et Lamiae El Moustafi  
CEA/ISEC/DPME



# ICG Spring School 2026

**Glass for a sustainable future: How can glass scientists help meet the challenge?**

**Jointly organized by ICG TCs 03, 05, 06, 07, 18, 23, 27, 28**

**Organizing & scientific committee:** S. Schuller, T. Charpentier, F. Méar, M. Lancry, L. Cormier, D. de Ligny, N. Créon, A. Goel, R. Pokorny, J. McCloy, A.C. Martins Rodrigues, Y. Yue, J. Du, D. Neuville

<https://icg-school2026.sciencesconf.org/>

**Abstract submission deadline for poster:** **Until 31st January 2026**

**Registration Early-bird deadline:** Opening 1st October 2025 **until 31st January 2026**

**Registration Deadline:** 28th February 2026

## Poster Submission – Student poster Award

- The challenges of decarbonizing the glass industry
- Basic science on glass fabrication (structure, formulation, glass melting, durability, mechanical properties, redox, thermal, thermodynamic, electrical conductivity,...)
- Current and future glass furnace technologies
- Simulation approaches and machine learning
- Use of secondary materials - eco-design glass, glass recycling, glass reusing, lighter glasses
- Glass for energy transition



**Location: Lazure hotel Lloret del Mar :** <https://www.lazure-hotel.com/en/meetings-and-events>



**The ICG Spring School 2026** will bring together glass experts from industry and academia under one roof to discuss the grand challenges essential for making glass production sustainable and glass as a material for a sustainable future. The five-day event will be organized in a school format, where the lectures by experts from industry. The overarching goal of the school is to educate students, researchers, engineers about the latest developments in glass science and technology and be able to progress toward a sustainable future for the glass industry.

# Next SUMGLASS



武汉理工大学  
WUHAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



硅酸盐科学与先进建材全国重点实验室  
State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures



BORCH  
—博创会务—



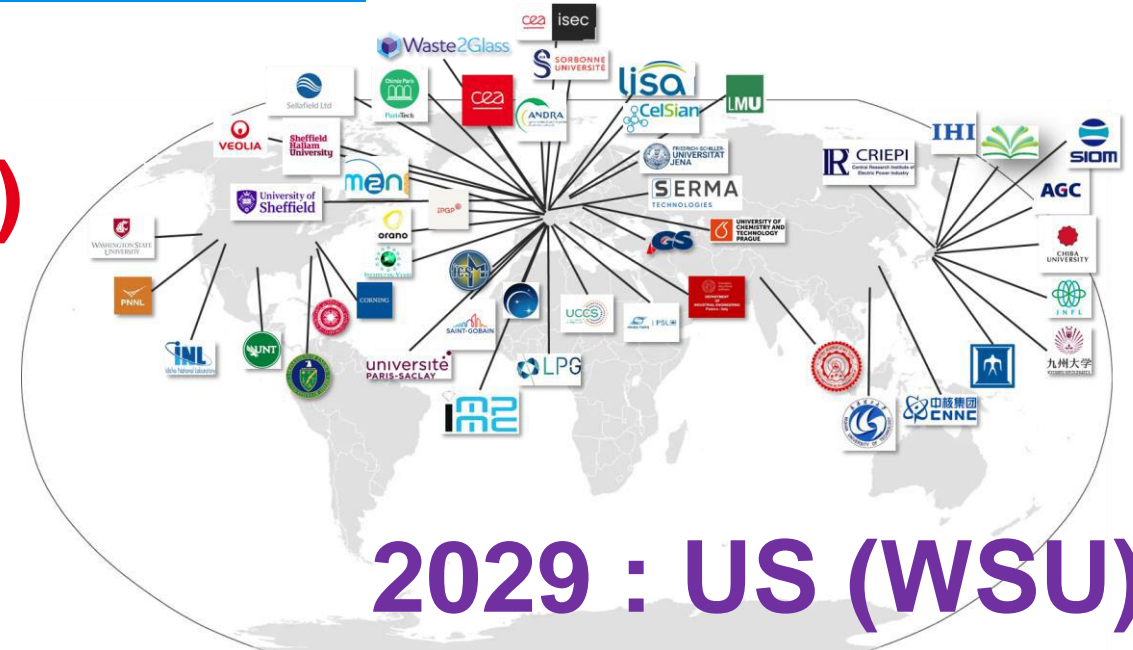
Wuhan  
(China)  
2025



2027: South of France (CEA)

2013: France, pont du Gard

2023: France, Nimes



2029 : US (WSU)



# Merci pour votre attention

## Remerciements

**CEA/ISEC Marcoule** : Emilien Sauvage, Elise Regnier, Zineb Nabyl, Sarah Hocine, Dorian Beslay, Théo Pitarch, Renaud Podor, Joseph Lautru, Sylvain Mure, Virginie Benavent, Cloé Laurin

**CEA/IRENE Cadarache** : Romain le Tellier

**CEA/ISAS Saclay** : Alain Cartalade, Capucine Méjanès

**Institut polytechnique de Paris** : Mathis Plapp

**St Gobain SVI** : Ekaterina Burov

**Université Aix Marseille** : Pierre Benigni, Jacques Rogez

**Université Nancy GEMICO** : Philippe Marchal

**Institute of Rock Structure and Mechanics, Czech Academy of Sciences, Prague, République Tchèque** : Jaroslav Klouzek

**Ludwig Maximilians University (LMU) Munich, Germany** : Luiz Pereira

**Concordia University Montréal** : Adrien Donatini

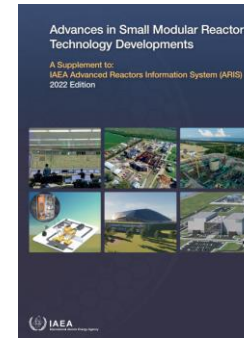
**Department of Materials Science and Engineering, Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany** : Dominique de Ligny





# Bibliographie

[https://aris.iaea.org/Publications/SMR\\_booklet\\_2022.pdf](https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf)



Nabyl Z, Schuller S, Podor R, Lautru J, Sauvage E, Artico A, et al. French Nuclear glass synthesis: focus on liquid waste dissolution kinetics. Journal of Nuclear Materials 2024

Paraiso K, Sauvage E, Schuller S, Hocine S, Lemaitre V, Burov E. Characterization and modeling of chemical reactions taking place during the vitrification of high level nuclear waste. Journal of Nuclear Materials 2022

Paraiso K. Modélisation et simulation numérique de l'élaboration du verre dans les procédés de vitrification des déchets nucléaires de haute activité, thèse de doctorat 2021

Sauvage E. Modélisation numérique thermo-hydrodynamique et inductive d'une fonte verrière élaborée en creuset froid inductif 2007.

N. Pereira Machado, L. Pereira, M. Neyret, C. Lemaître, P. Marchal. Influence of platinum group metal particle aggregation on the rheological behavior of a glass melt. Journal of Nuclear Materials 2022

J. Jiusti, E. Regnier, V. Malivert, ML. Ghazzai, E. Brackx, M. Neyret, E. Sauvage, F. Faure, P. Marchal, "Crystallization and rheological study of a Nd-oxyapatite-bearing melt", 2024