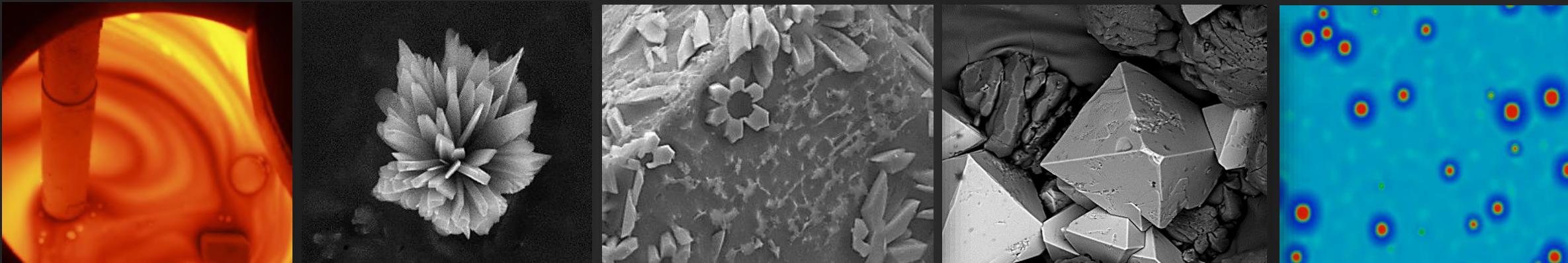


Elaboration de matrices vitreuses de conditionnement de déchets radioactifs – Les dernières avancées

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

Journée verre 2025 - Roscoff 5-7 Novembre 2025

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



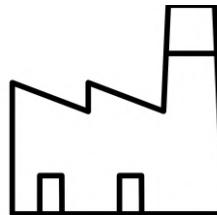
Décarbonation

- 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

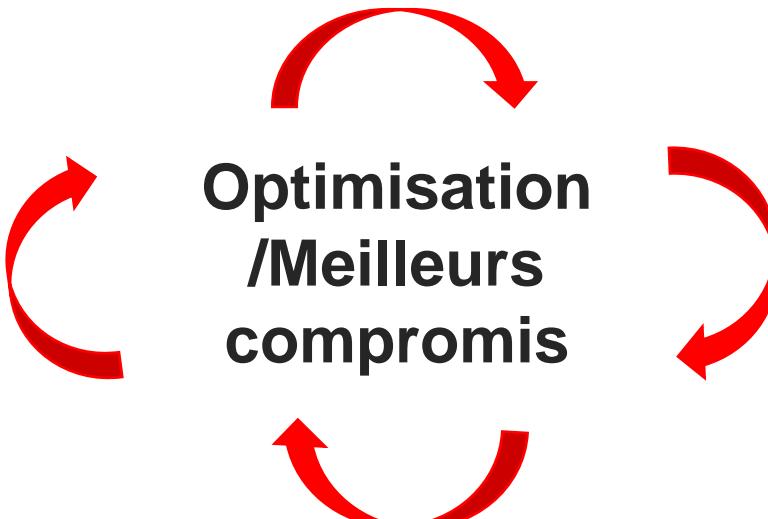
Enjeux : Optimisation des verres de conditionnement de déchets radioactifs



Optimisation matrice de conditionnement

Faisabilité technologique, qualité/homogénéité, comportement à long terme

cea

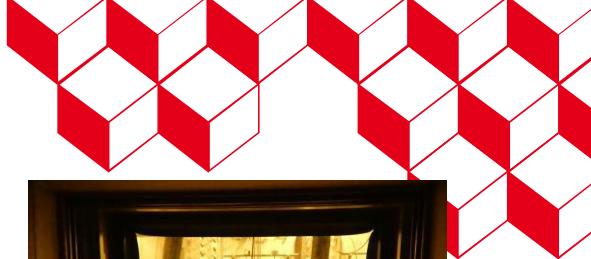


Cahier des charges
→ Spécification des déchets nucléaires, composition, quantité, radioactivité, taux de charge en déchets



Optimisation procédés de vitrification industriel

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



Cahier des charges

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

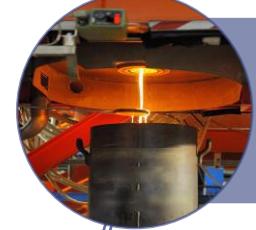


Soutien industriel et opérationnel

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



Approche de modélisation/ simulation multi- échelles multiphysiques



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

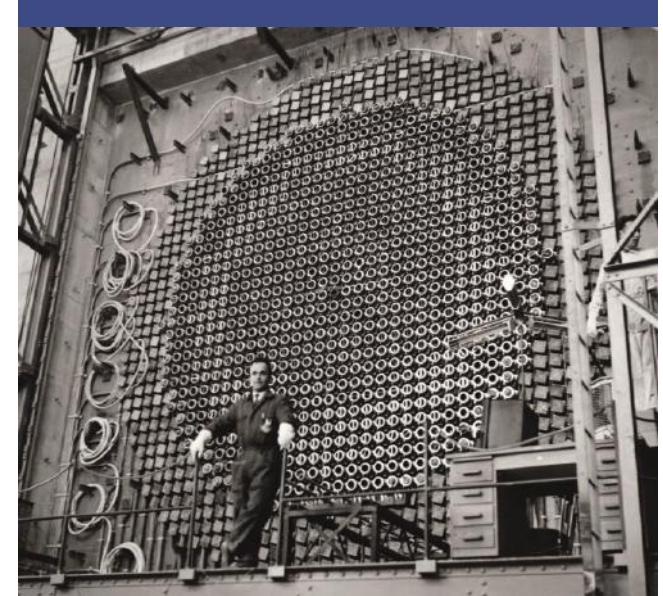


Etude des matrices de conditionnement

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



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

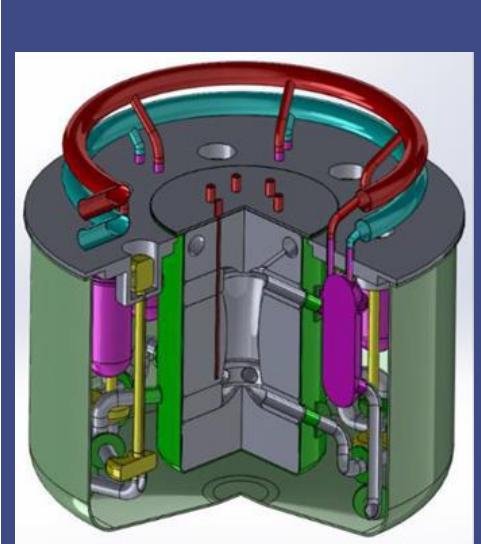
Déchets de hautes activités issus des combustibles actuels

Uranium Oxyde (UO₂) (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)

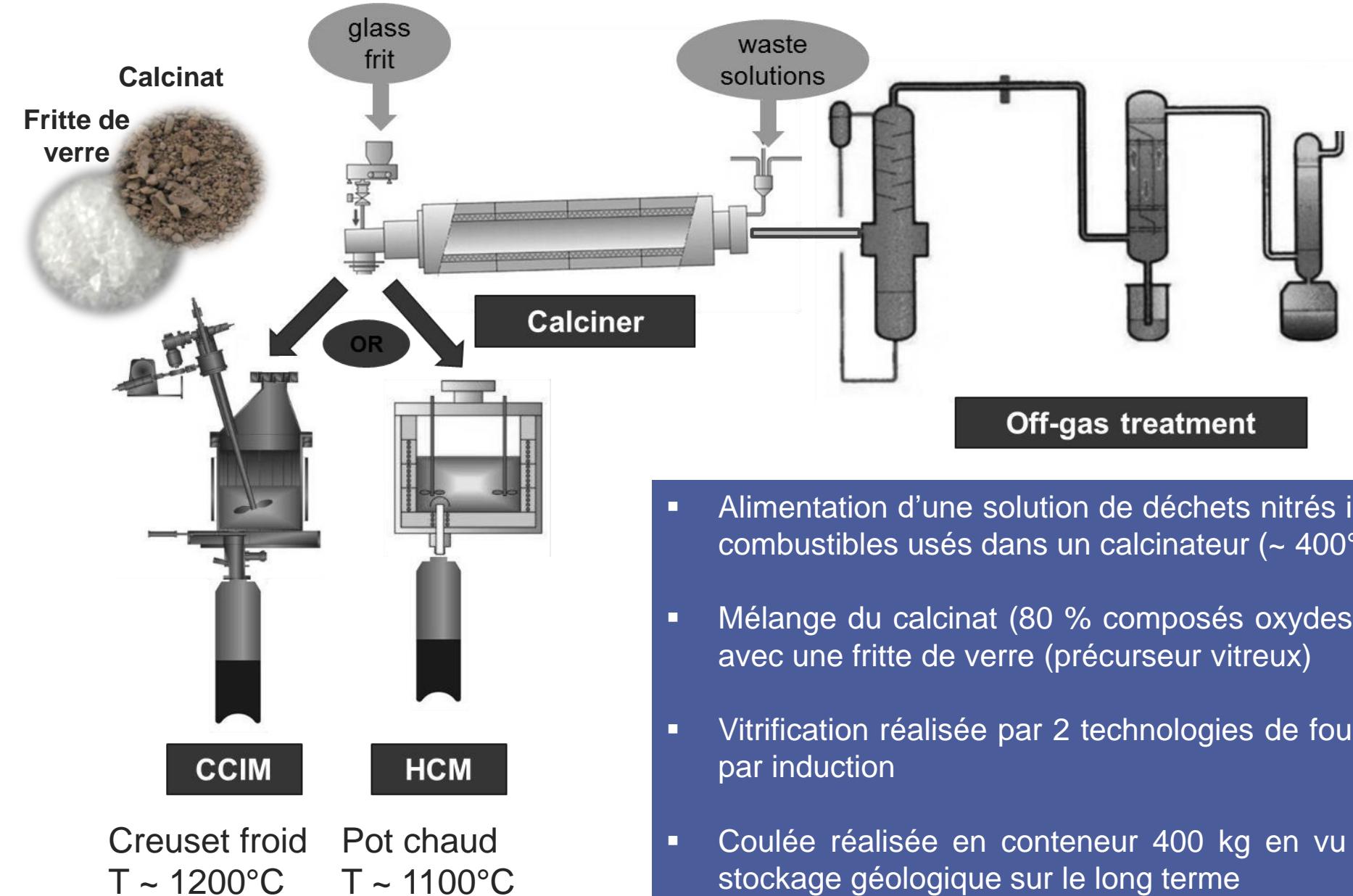
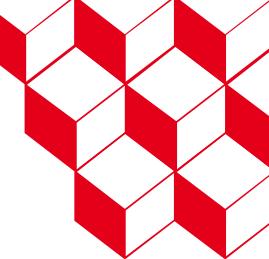
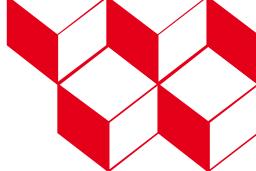


Réacteur génération IV

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



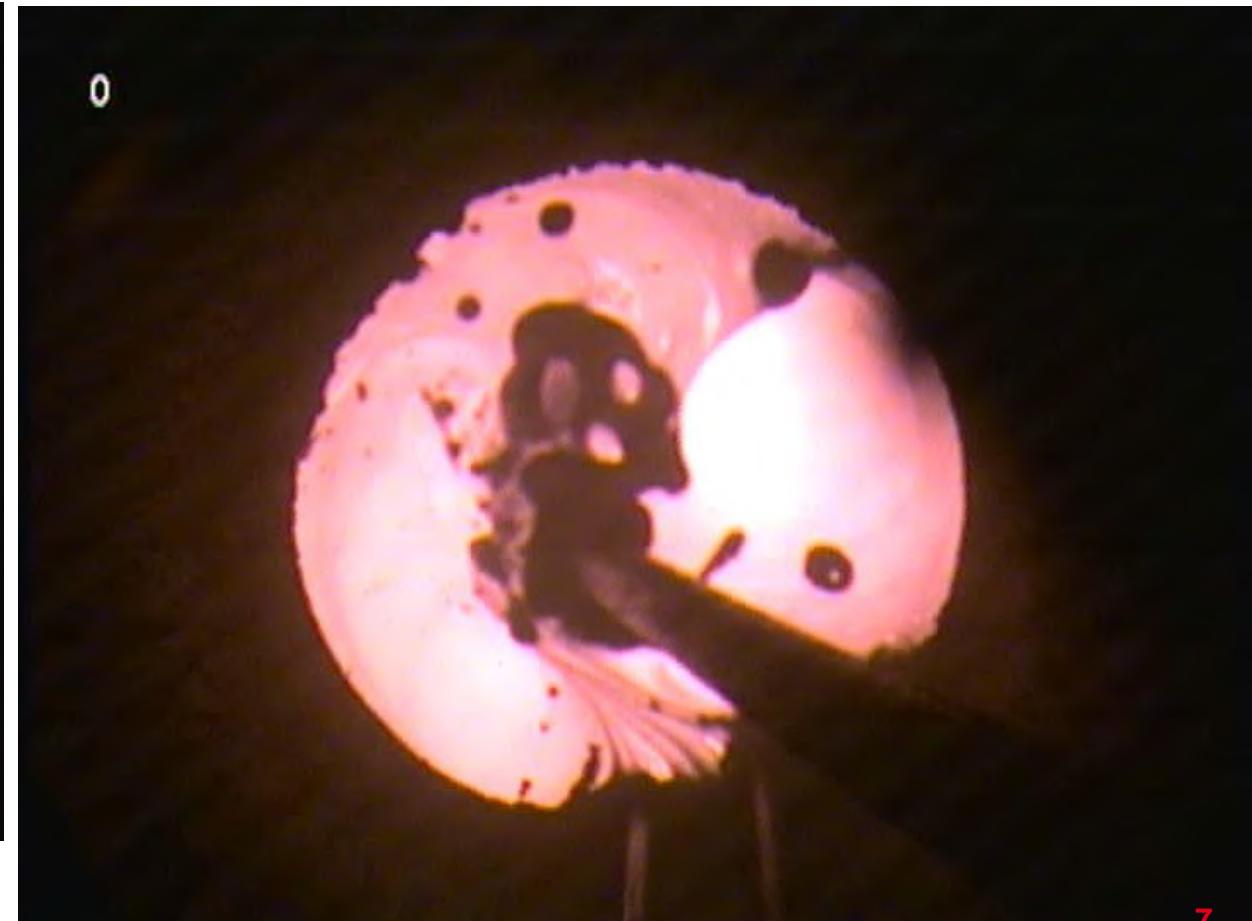
Exemple d'élaboration de verres en four chauffé par induction directe (creuset froid)

Alimentation calcinat + fritte de verre

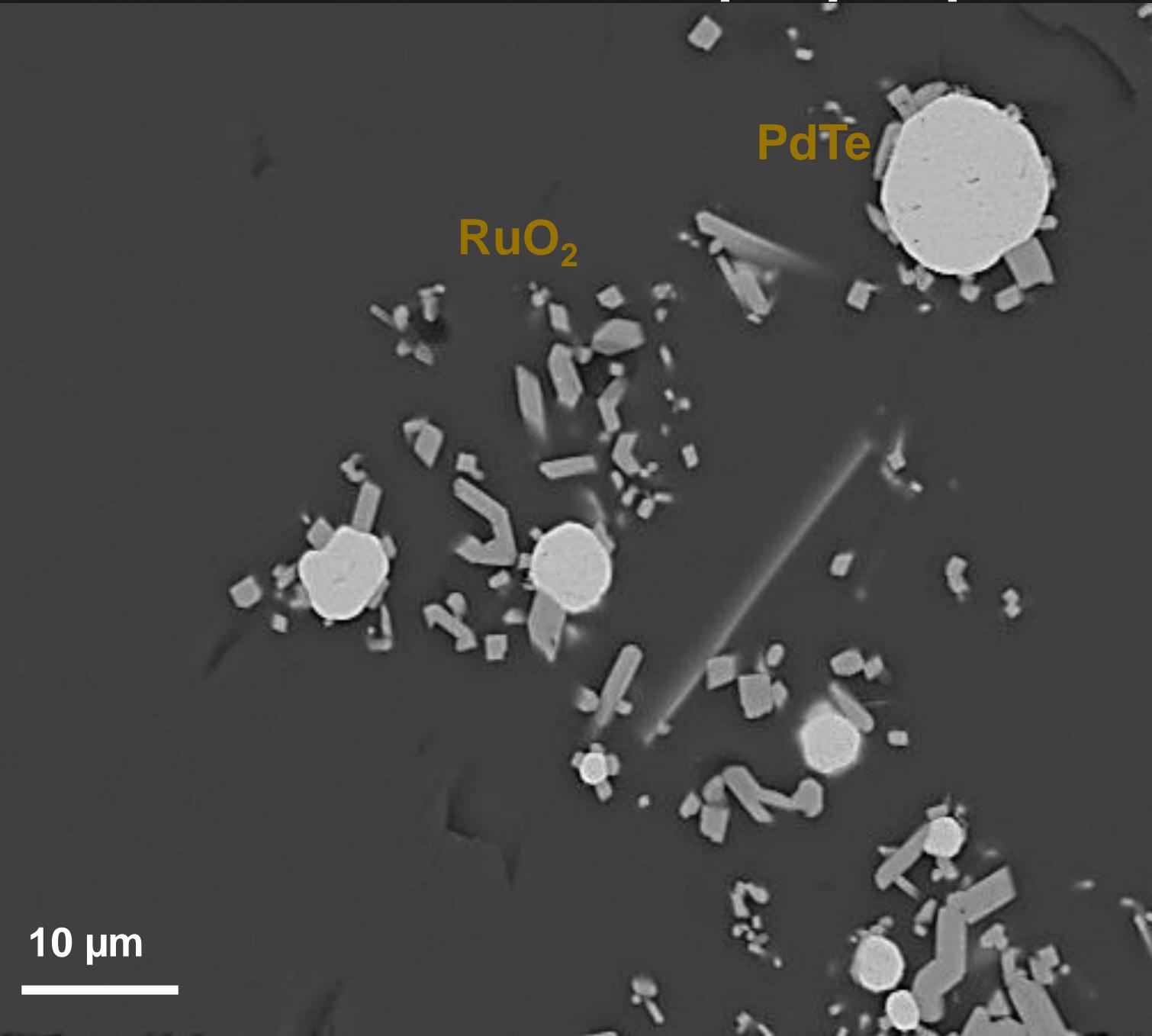


cea

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 ₂	58,84
Al ₂ O ₃	4,28
B ₂ O ₃	18,15
Na ₂ O	7
Li ₂ O	2,56
CaO	3,24
ZnO	5,23
ZrO ₂	0,7

+
non radioactif
Calcinat de
type UOX



MEBE : Col ISCM
R. Podor

Composés

NaNO₃

CsNO₃

RbNO₃

Sr(NO₃)₂

Ba(NO₃)₂

Te(OH)₆

SeO₂

H₃PO₄

Al(NO₃)₃.9H₂O

Na₂SnO₃.3H₂O

Sb₂O₃

RuNO(NO₃)₃

Zr(NO₃)₂.4H₂O

Cr(NO₃)₃.9H₂O

H₃[PMo₁₂O₄₀]

Fe(NO₃)₃.9H₂O

La(NO₃)₃.6H₂O

Ce(NO₃)₃.6H₂O

Pr(NO₃)₃.xH₂O

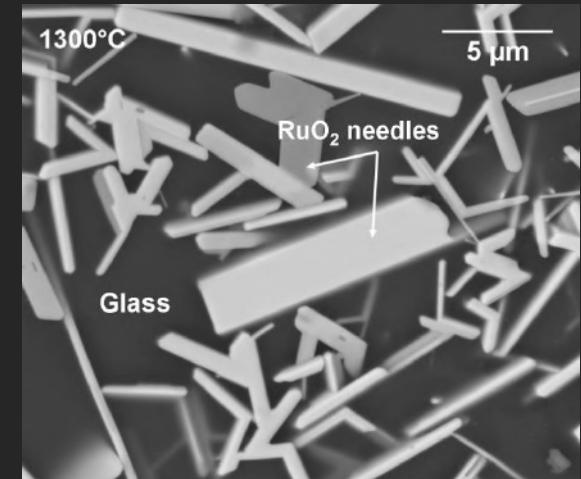
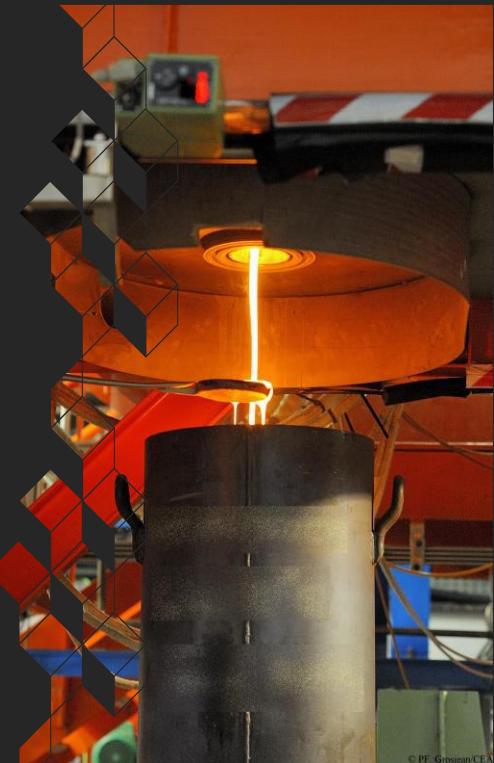
Nd(NO₃)₃.xH₂O

R&D élaboration des verres actuels (combustibles usés de type Uranium O₂Yde) 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)

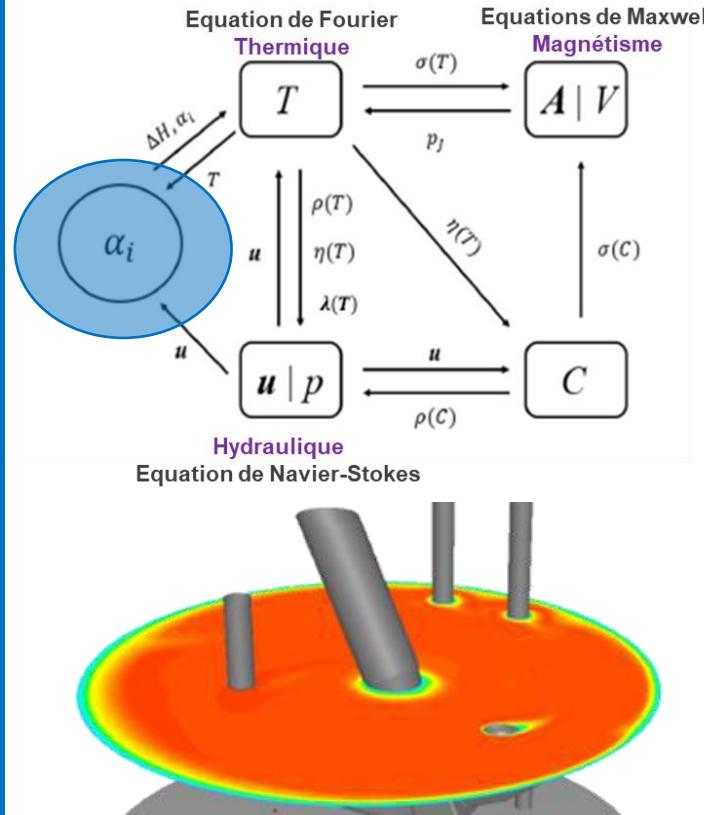


1- Simulation multiphysiques de l'élaboration des verres radioactifs

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



Modèle Magnéto-Thermo-Hydraulique



Thèse Guillaume Barba Rossa 2017

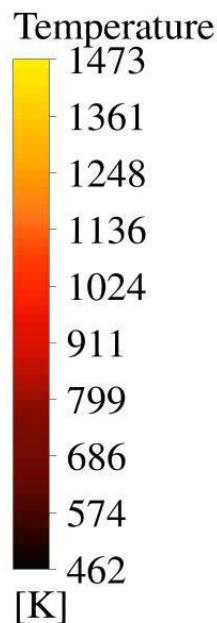
E. Sauvage WM2010 Phoenix Arizona 2010

(α_i) : Degré d'avancement de la réaction

Simulation/expérience en four résistif type Saint Gobain

Time = 10 [s]

Thermocouple



Thermocouples de mesure



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

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

Détermination degré d'avancement de la réaction (α_i)



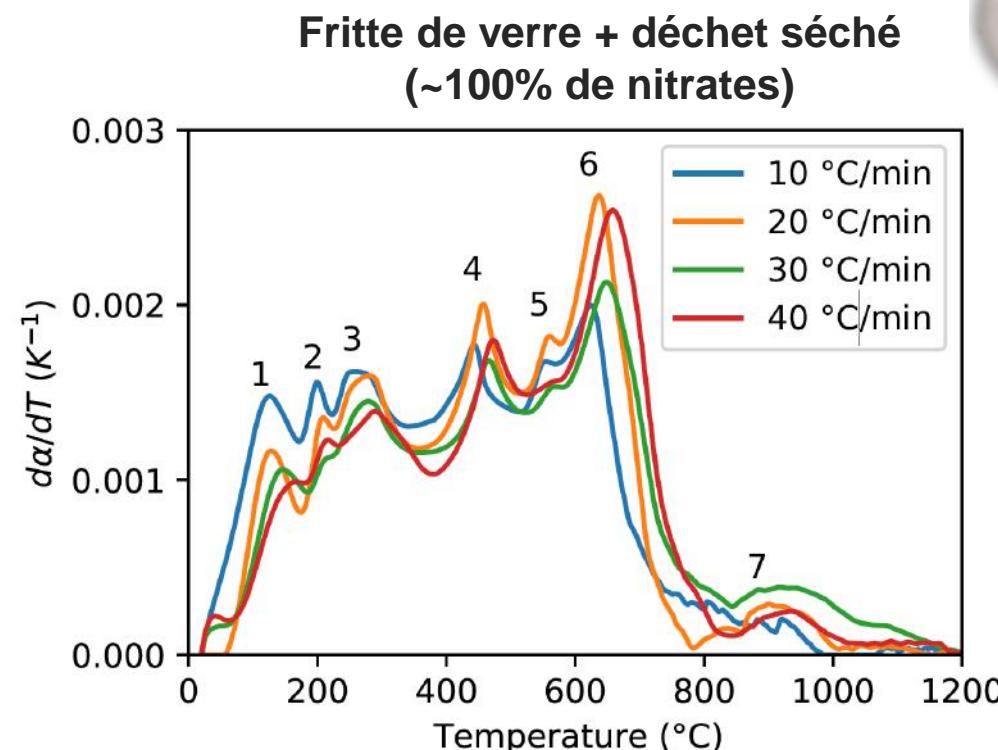
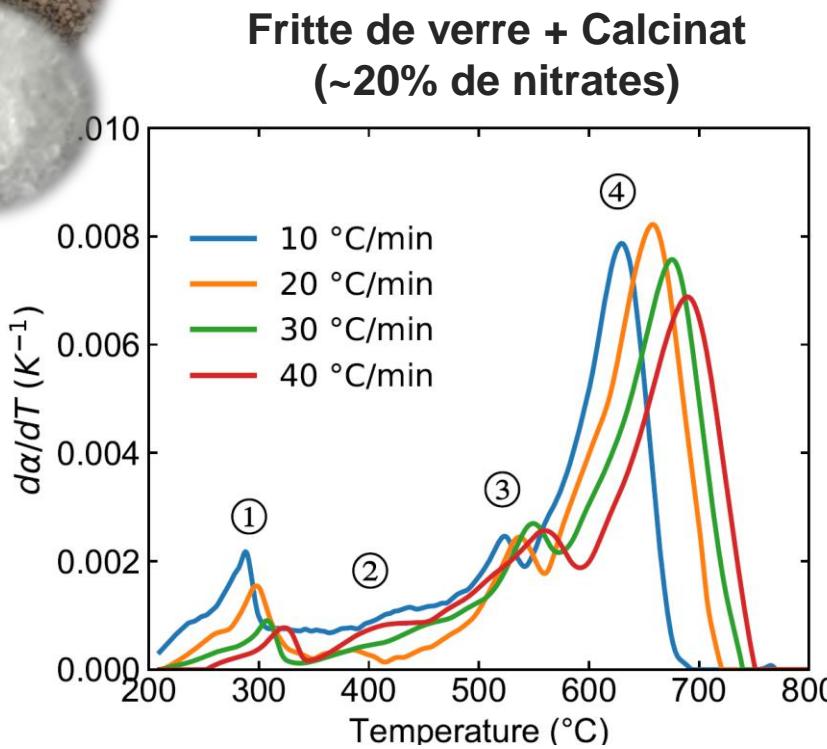
Détermination du degré d'avancement des réactions de dénitrification par ATD

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



- 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



Détermination des paramètres cinétiques



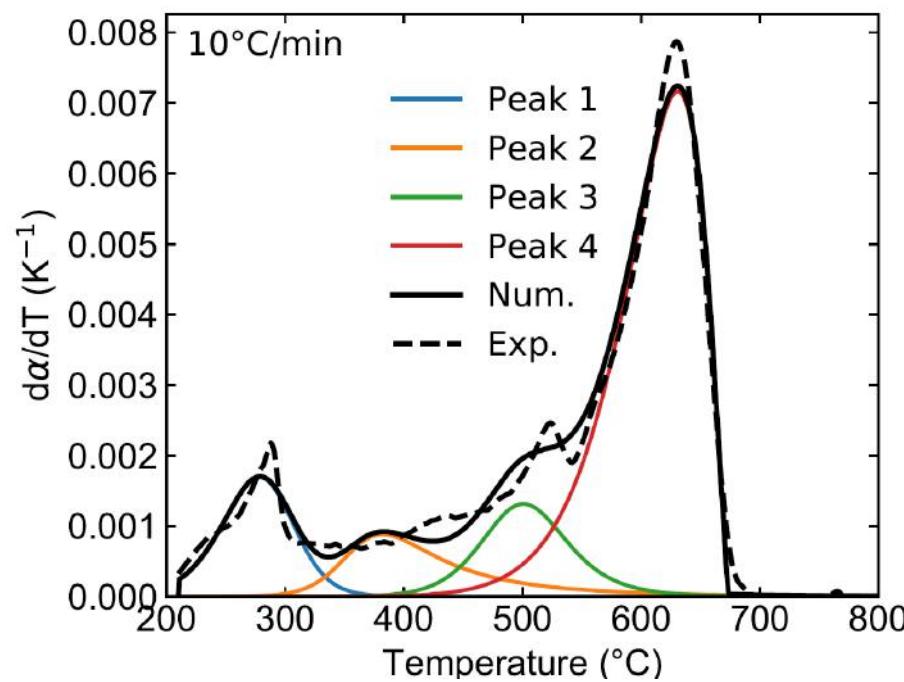
La vitesse de réaction peut être exprimée en fonction du degré de conversion selon une loi d'Arrhenius

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

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

α_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

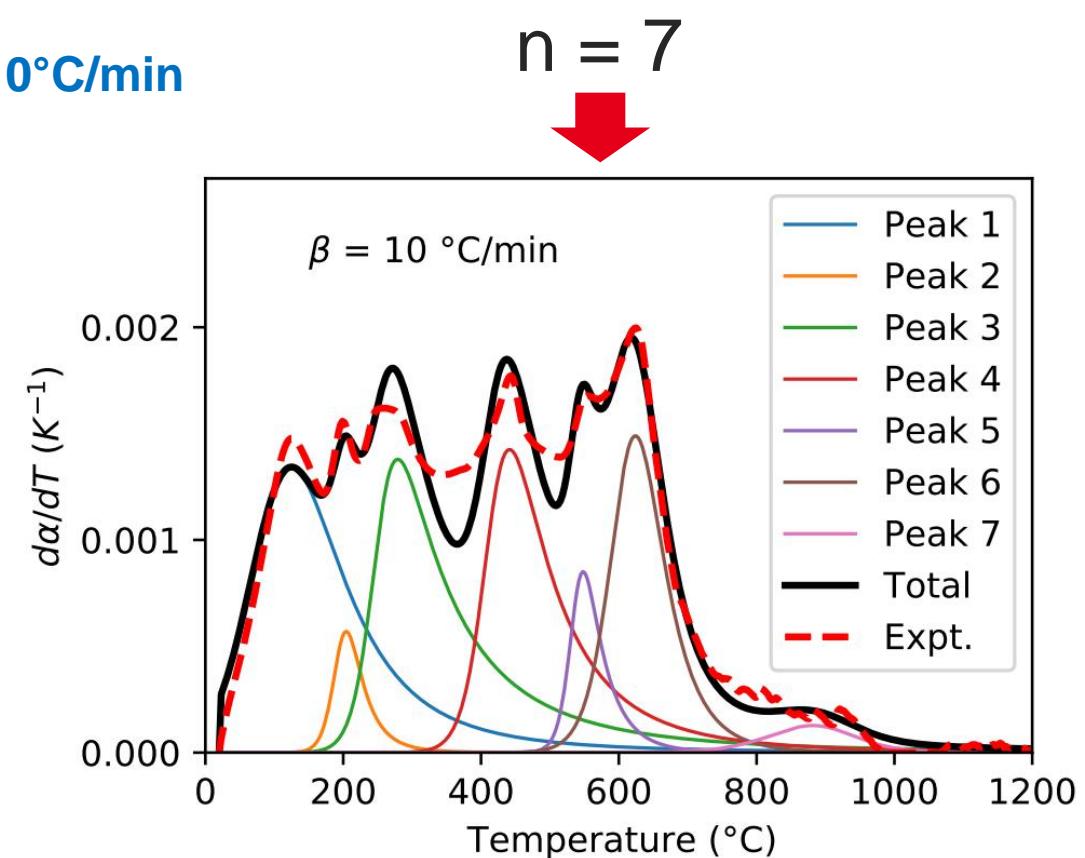
$$n = 4$$



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

$$\beta : \text{Rampe } 10^\circ\text{C/min}$$

$$n = 7$$

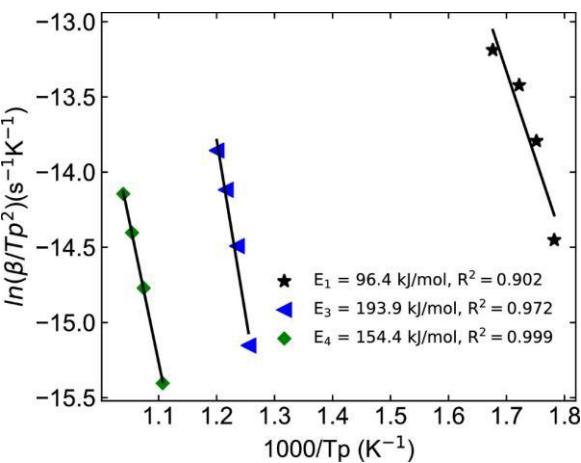


Fritte de verre + déchet séché (~100% de nitrates)

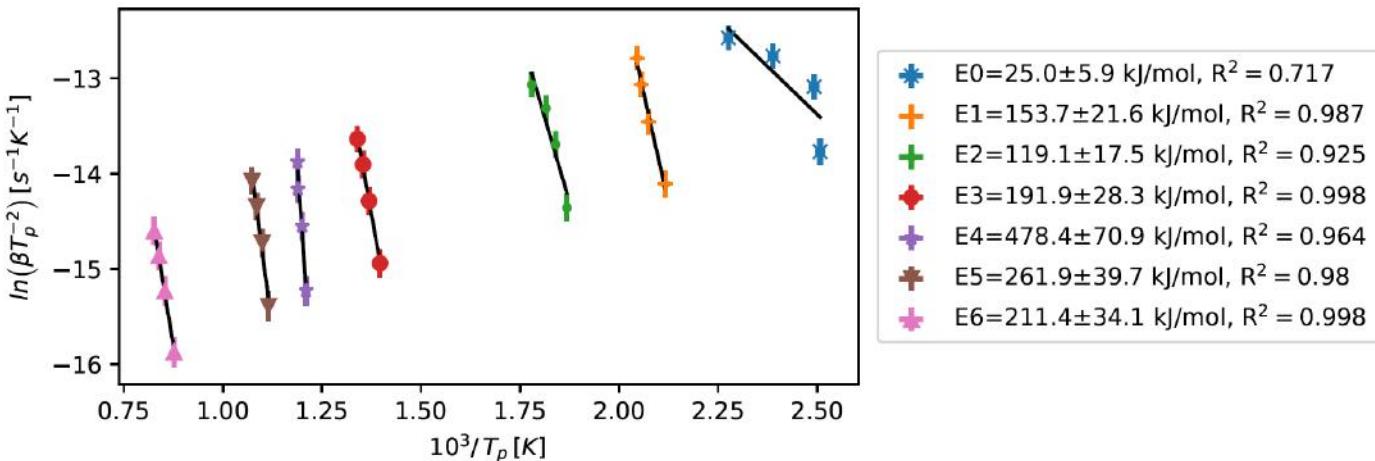
Détermination de l'énergie d'activation par la méthode de Kissinger

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

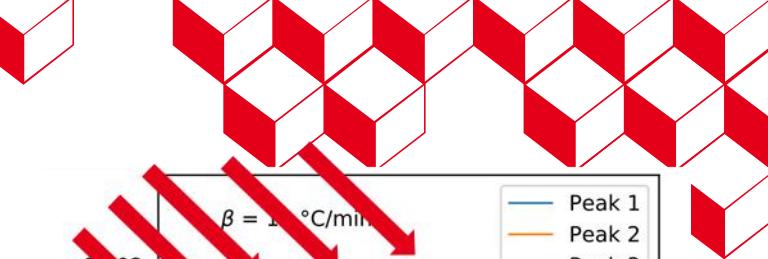
Tp : Température du pic
 β : Rampe de montée en température
 R : Loi universelle des gaz parfait
 E_i : Energie d'activation de la décomposition des nitrates



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

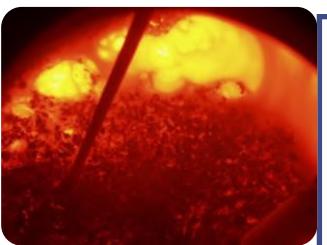
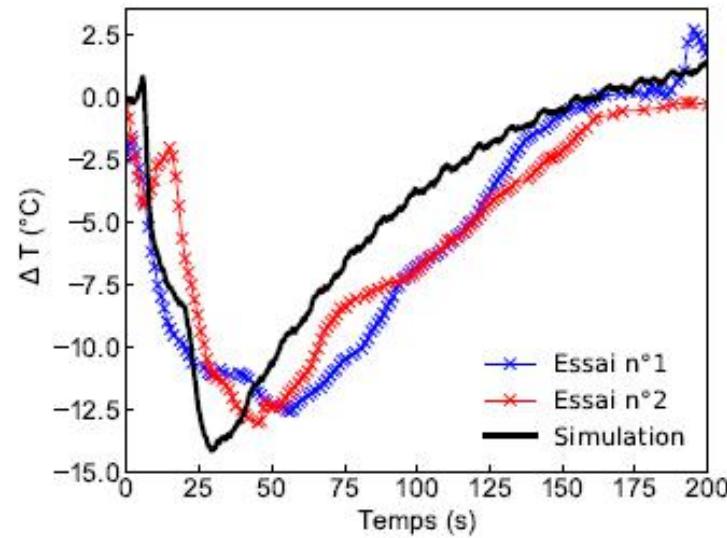
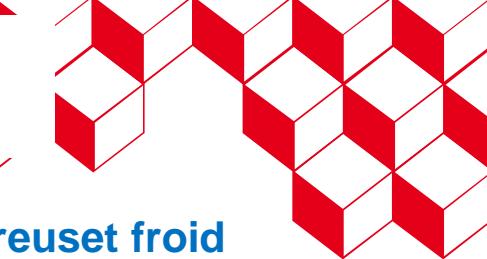


Fritte de verre + Déchet séché (~100% de nitrates)



Simulation multiphysiques de l'élaboration des verres radioactifs

→ Validation et transition du modèle au creuset froid



Application
au creuset
froid



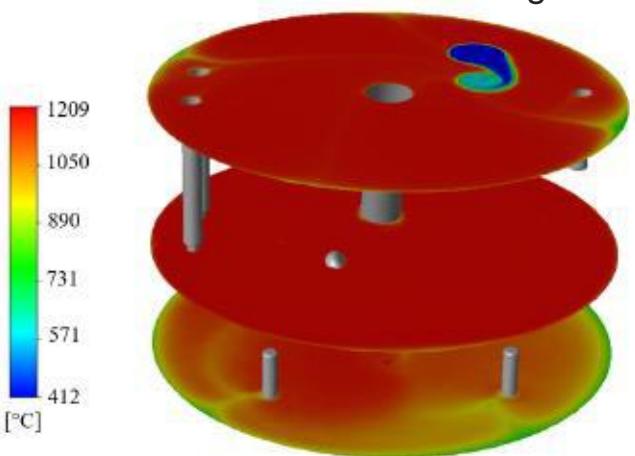
Validation du modèle
thermique



Simulation four induction directe : Creuset froid

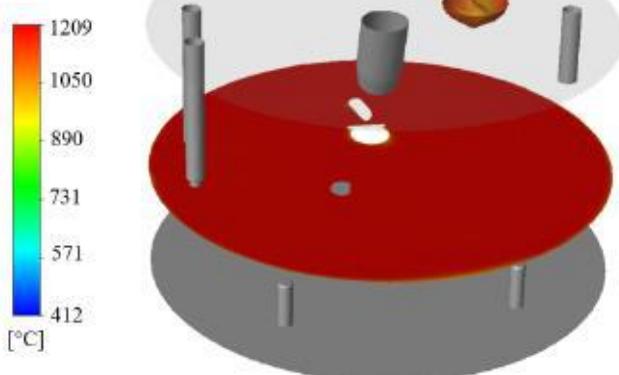
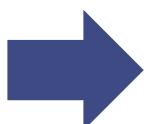
Résolution du modèle MTH-Chimie

- ✓ 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

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

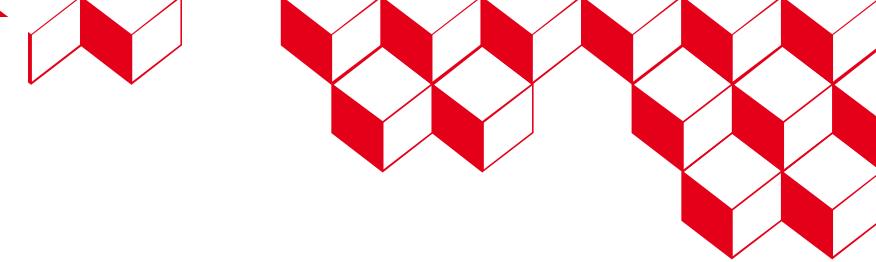


Front de réaction
(iso-contour α)

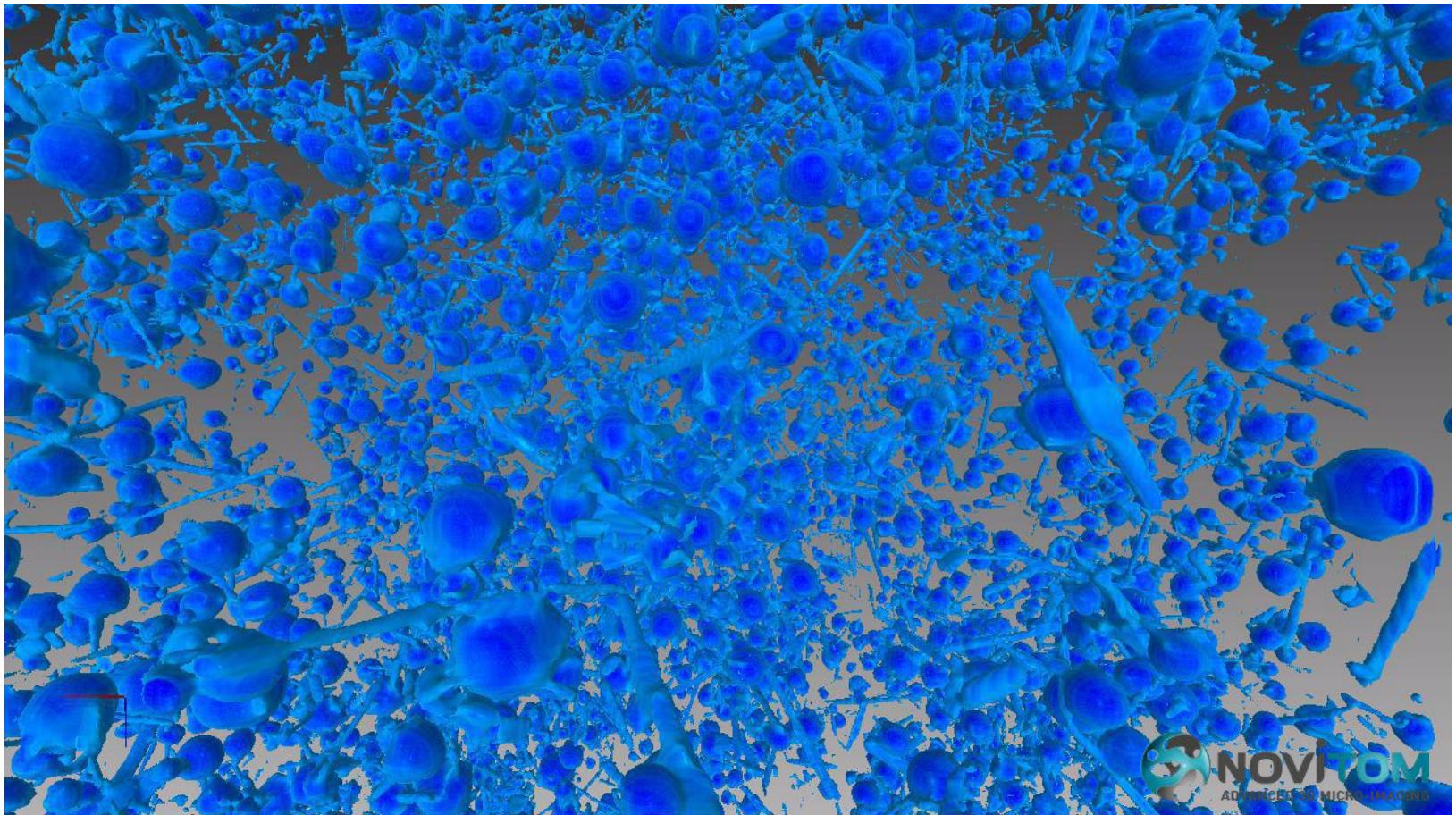
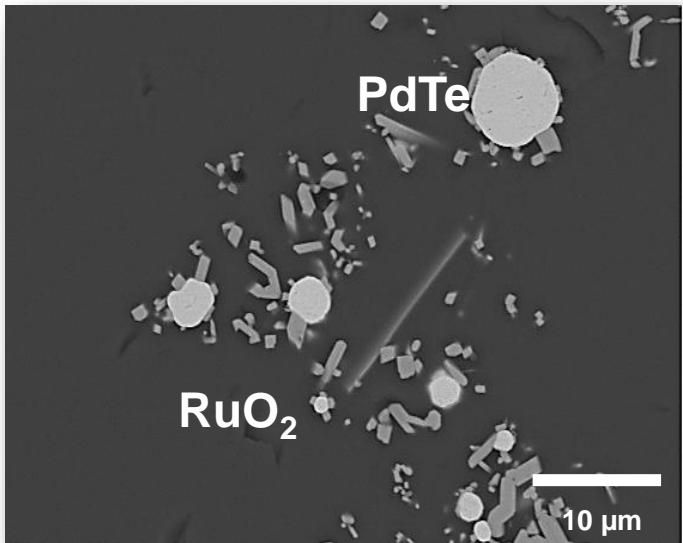
$$P_i \text{ affinage } 1200^\circ\text{C} = 163 \text{ kwatt}$$

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 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, 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 platinoides (RuO_2 , PdTe) sur la viscosité

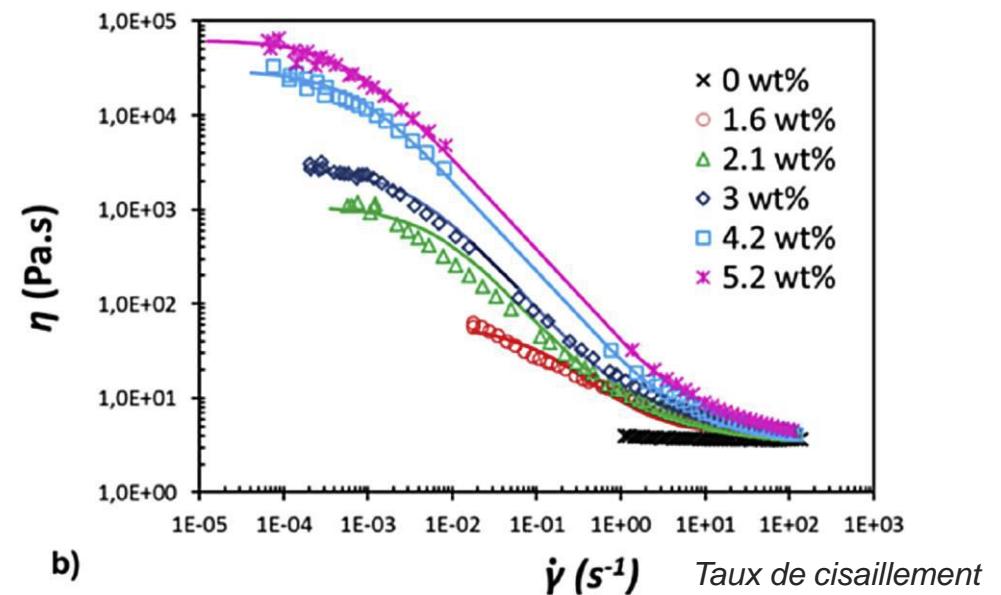
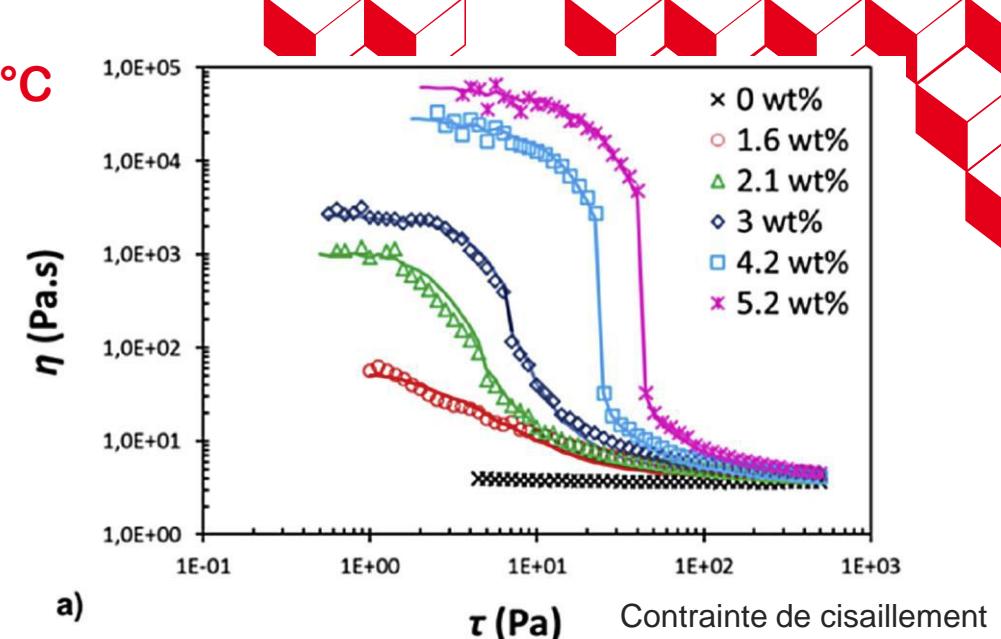
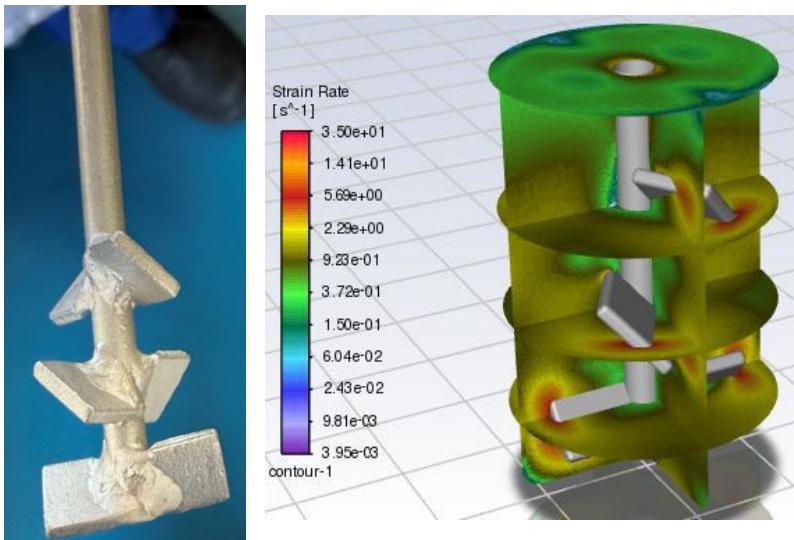
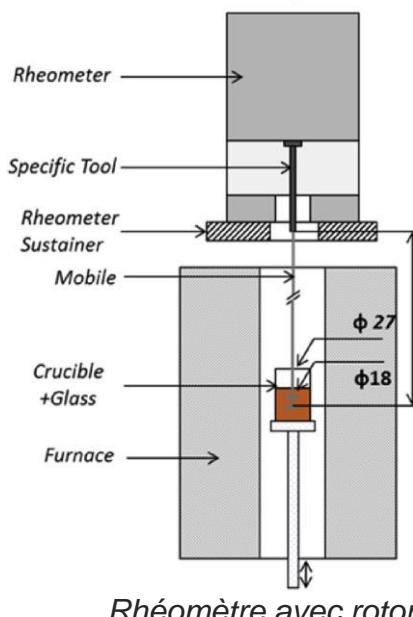
$T = 1200^\circ\text{C}$

Comportement non newtonien du verre contenant des platinoides

Le modèle de Vogel-Fulcher-Tamman (VFT)

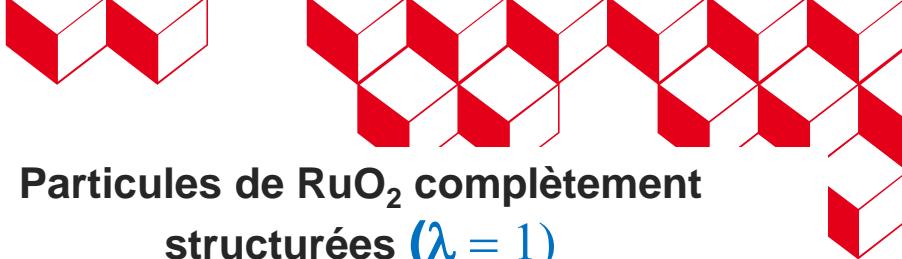
$$\log \eta(T) = A + \frac{B}{T - T_0}$$

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



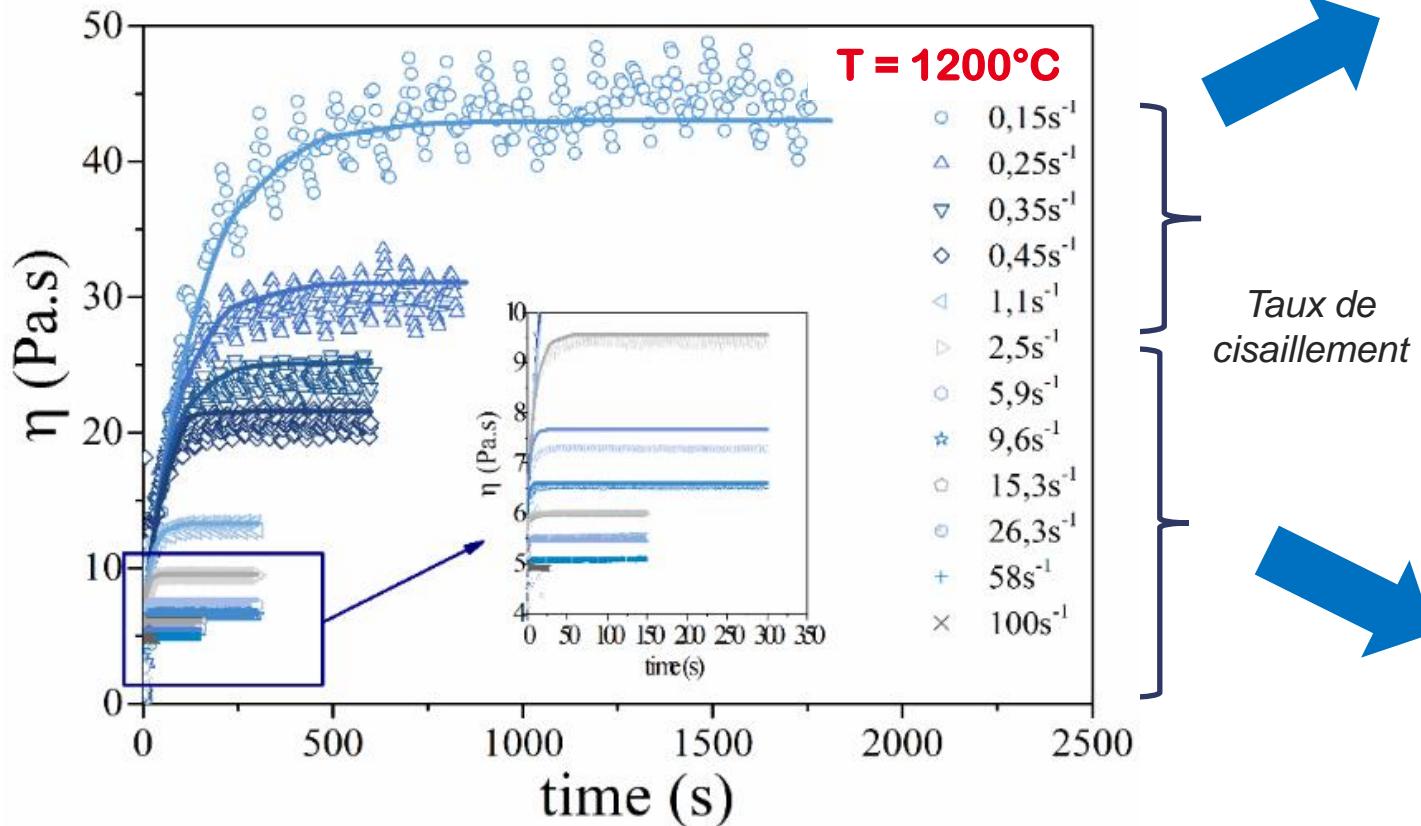
J. Puig, C. Hanotin, M. Neyret, P. Marchal, High temperature rheological study of borosilicate glasses containing platinum group metal particles by means of a mixer-type rheometer, Journal of Nuclear Materials 2016

Etude de l'influence du regroupement des particules de RuO₂ sur la viscosité

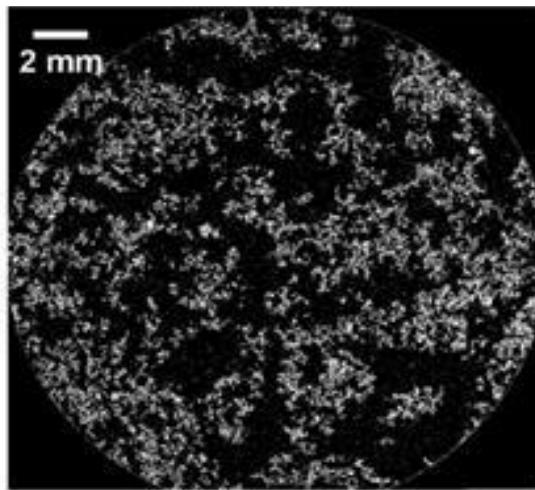


Mise en évidence du comportement thixotropique du verre : Viscosité = $f(t)$ dépendant du taux de structuration du RuO₂ (λ)

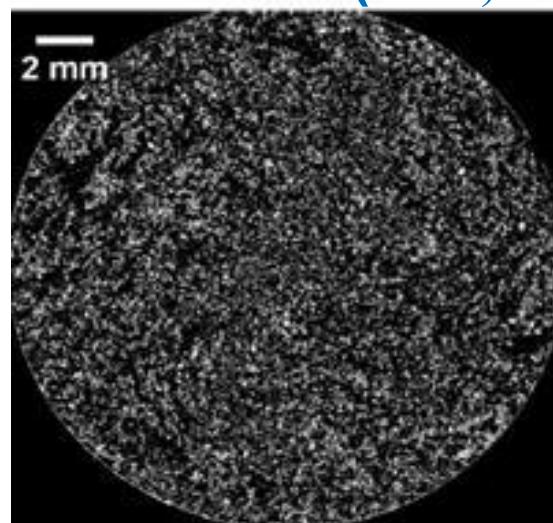
4,2 % massique RuO₂

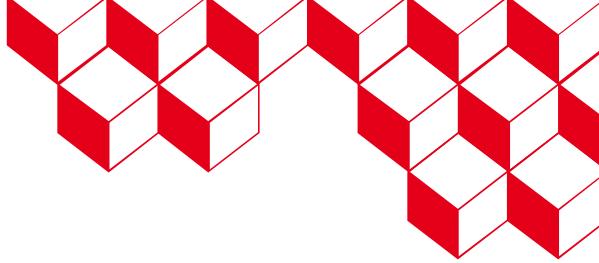


Particules de RuO₂ complètement structurées ($\lambda = 1$)



Particules de RuO₂ complètement déstructurées ($\lambda = 0$)



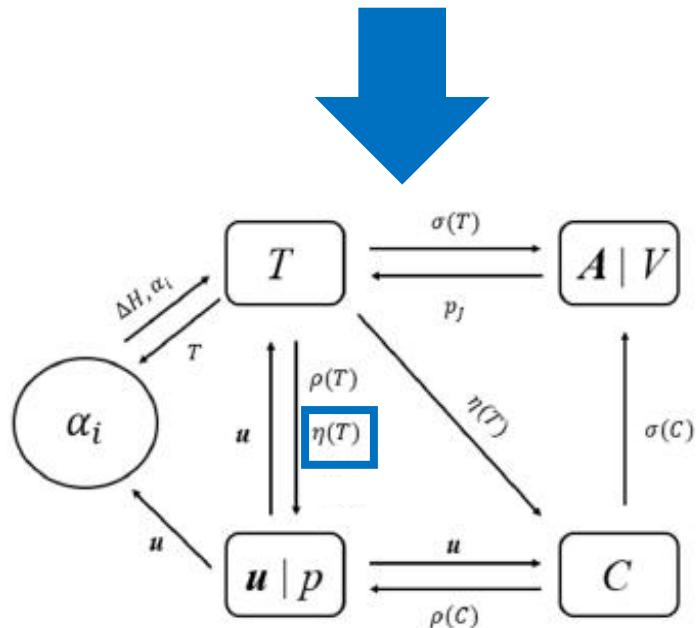


$$\eta = \eta_\infty + \lambda K_0 \dot{\gamma}^{\alpha-1}$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + u_i \frac{\partial \lambda}{\partial x_i} = a(1 - \lambda) - b\lambda \dot{\gamma}$$

Modèle de Houska

λ : Taux de structuration



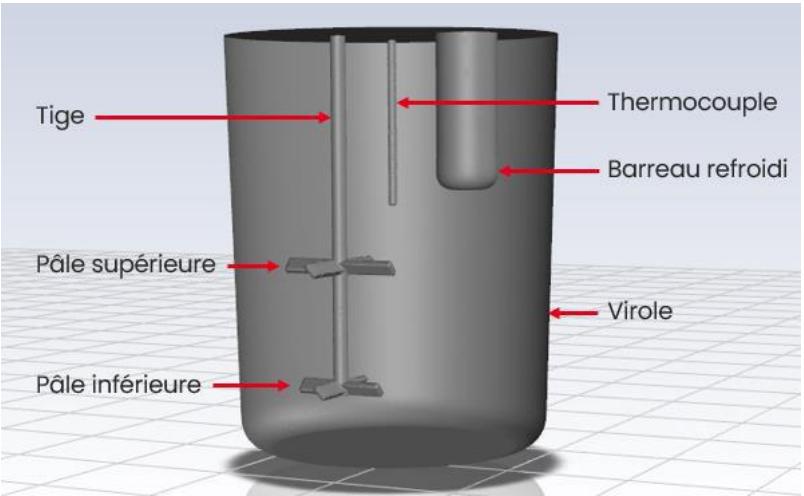
Modification de la loi de viscosité dans le modèle CFD

D. Beslay, E. Sauvage and S. Schuller, Modeling the Thixotropic Effect of Platinum-Group Elements in Nuclear Waste Glasses on the Vitrification Process, Submitted 2025

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



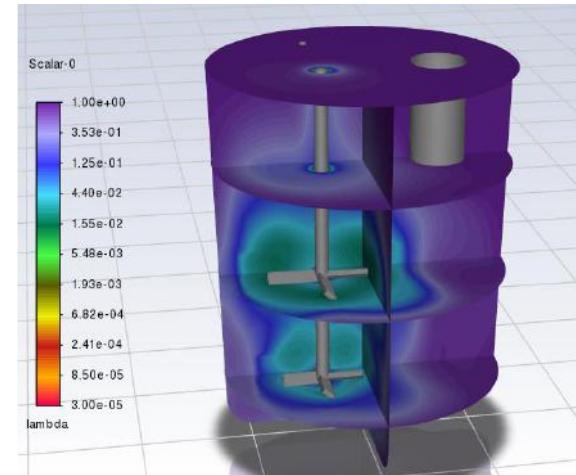
Le comportement thixotropique du verre affecte fortement la viscosité apparente dans le four agité à faible vitesse



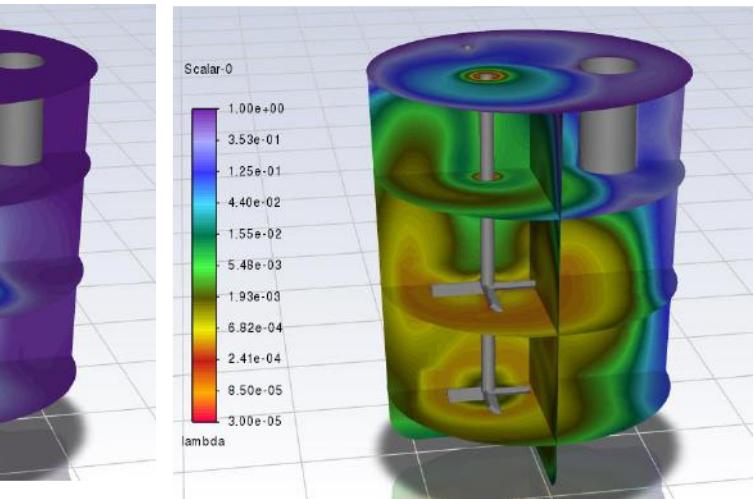
Nécessité d'optimiser les paramètres d'agitation, les concentrations en métaux nobles

5 tr/min

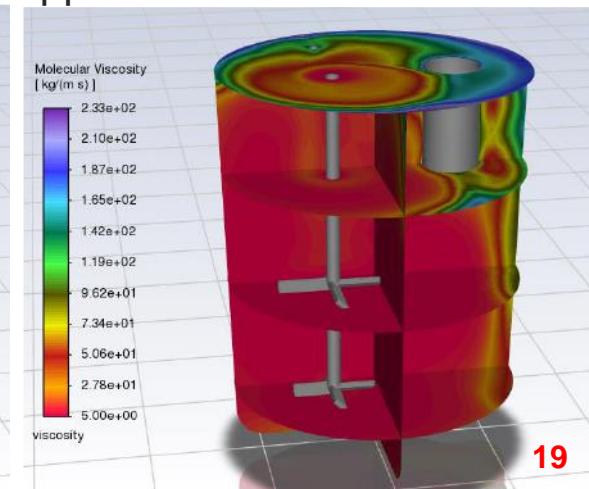
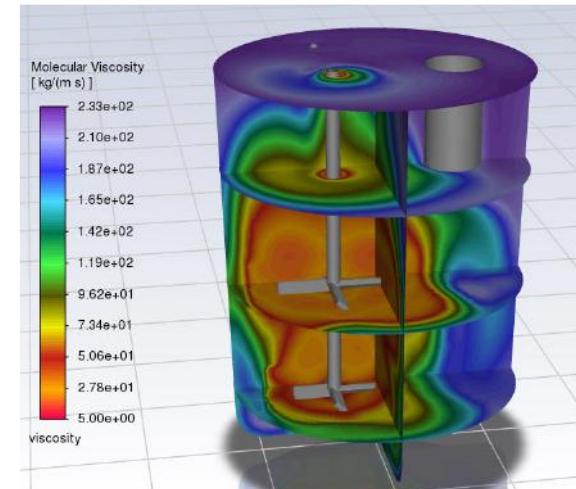
Taux de structuration λ



500 tr/min



Viscosité apparente



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



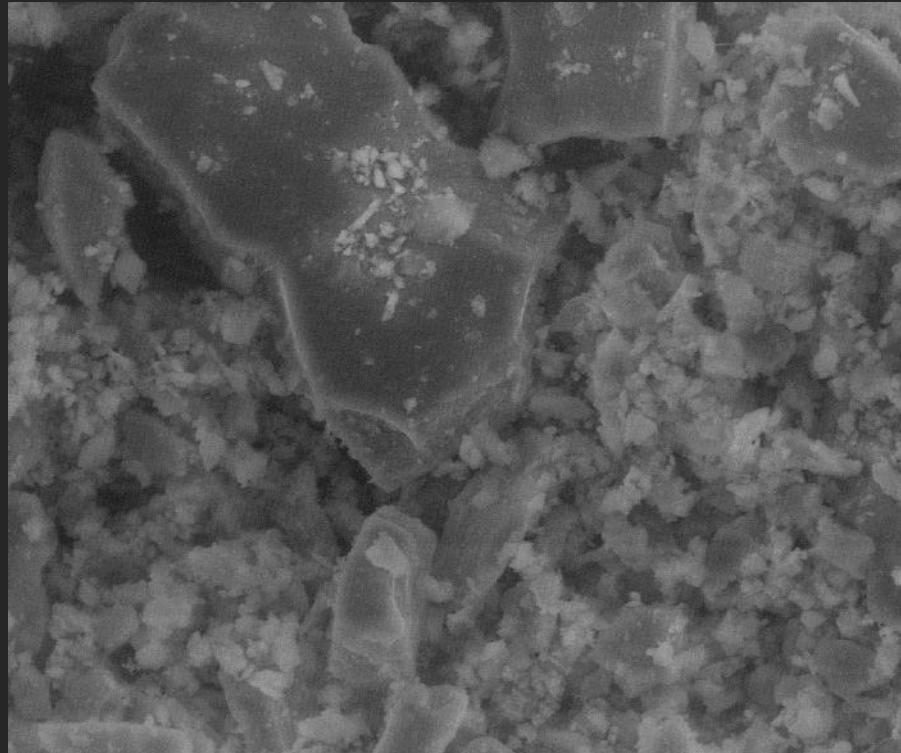
→ Etude des cinétiques de cristallisation et de séparation de phase ainsi que leur influence sur les propriétés physico-chimiques des verres

Augmentation des taux de charge en déchets



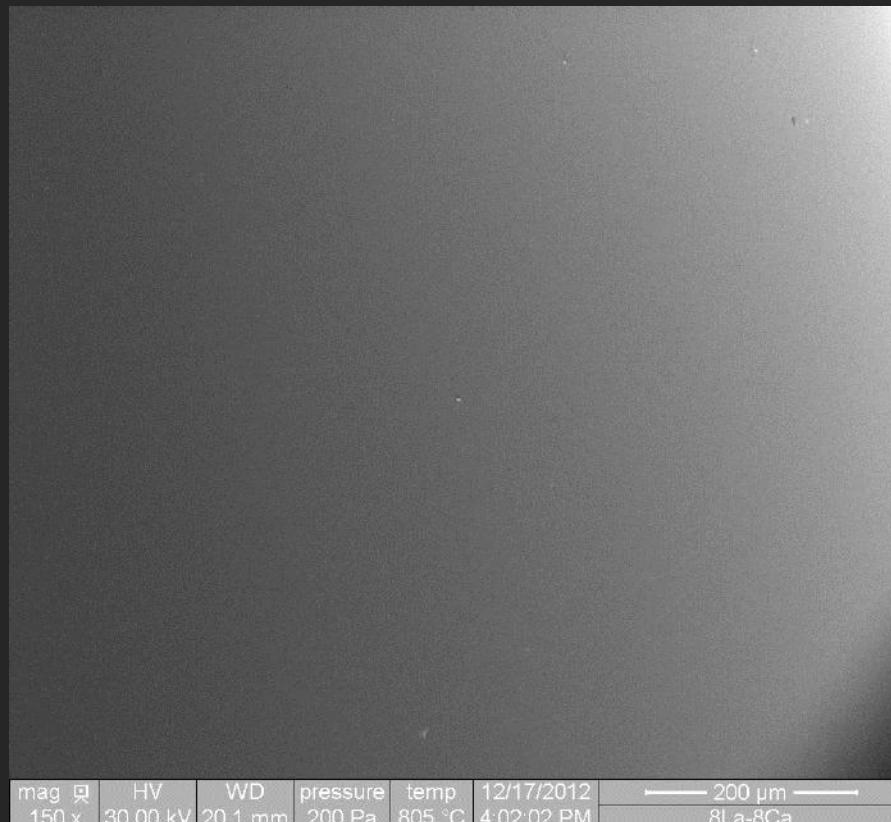
Augmentation des teneurs en terres rares, actinides, Mo, (Cr) ,...

Verre borosilicate enrichi en MoO_3



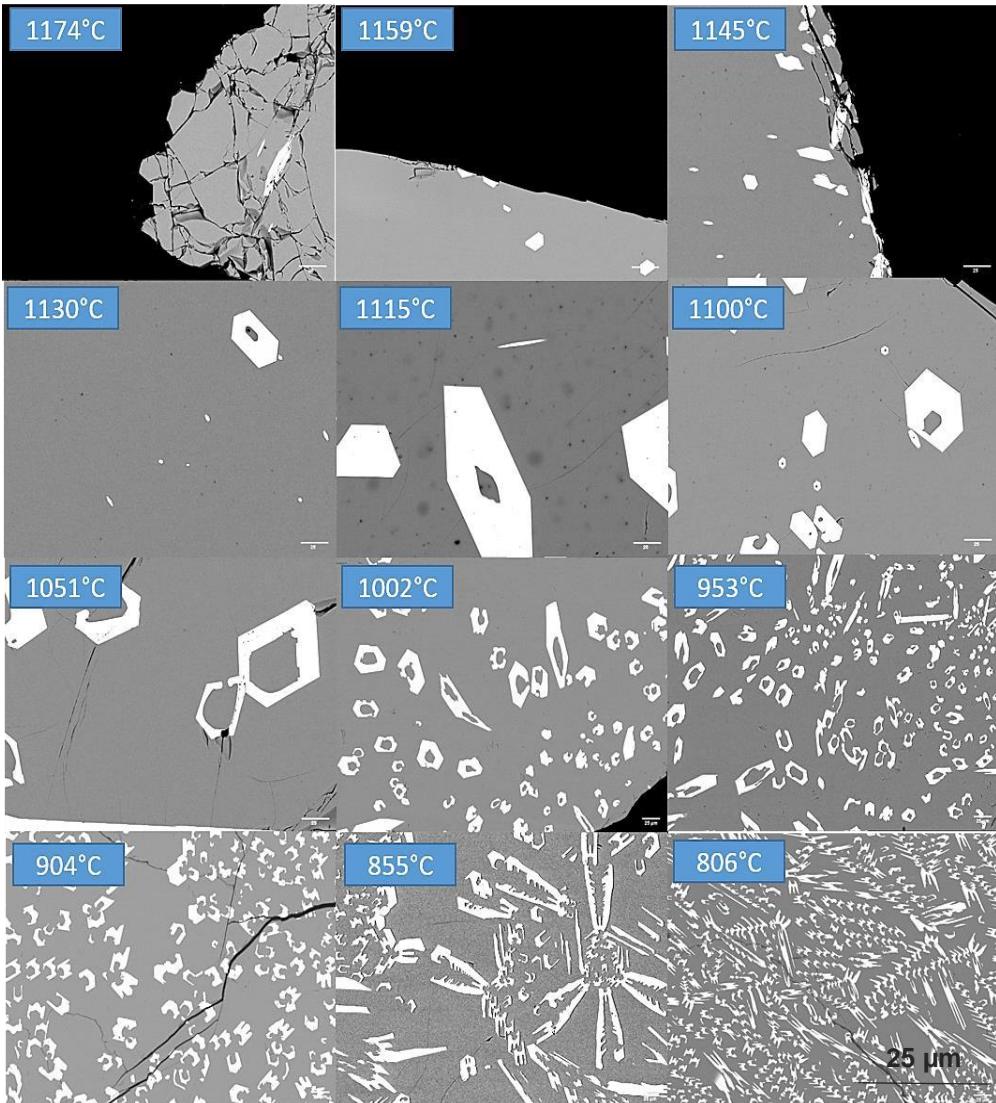
mag 500 x HV 30.00 kV 1/24/2013 pressure 350 Pa WD 21.0 mm temp 56 °C 50 µm 01Na2MoO4+F2

Verre borosilicate enrichi en Nd_2O_3



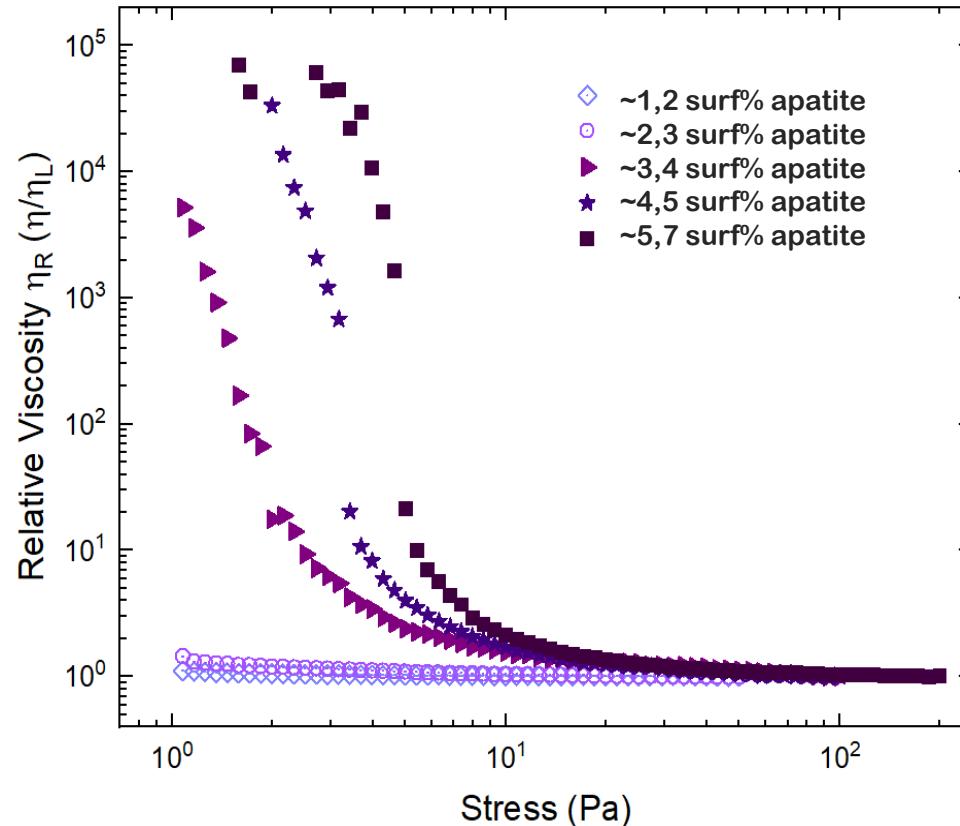
mag 150 x HV 30.00 kV WD 20.1 mm pressure 200 Pa temp 805 °C 12/17/2012 4:02:02 PM 200 µm 8La-8Ca

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

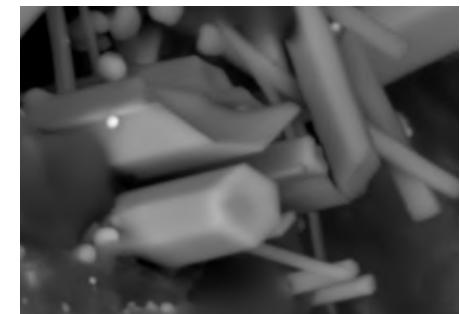


Evolution de la morphologie des silicates de terres rares en fonction de la température

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

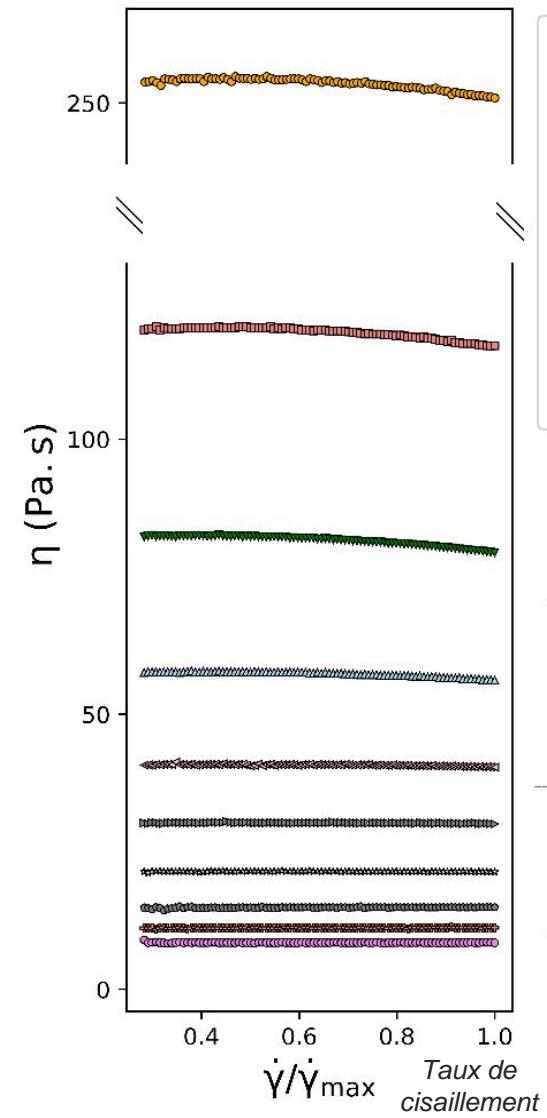


- Viscosité liquide résiduel peu modifiée
- Fort encombrement stérique des SiTr



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

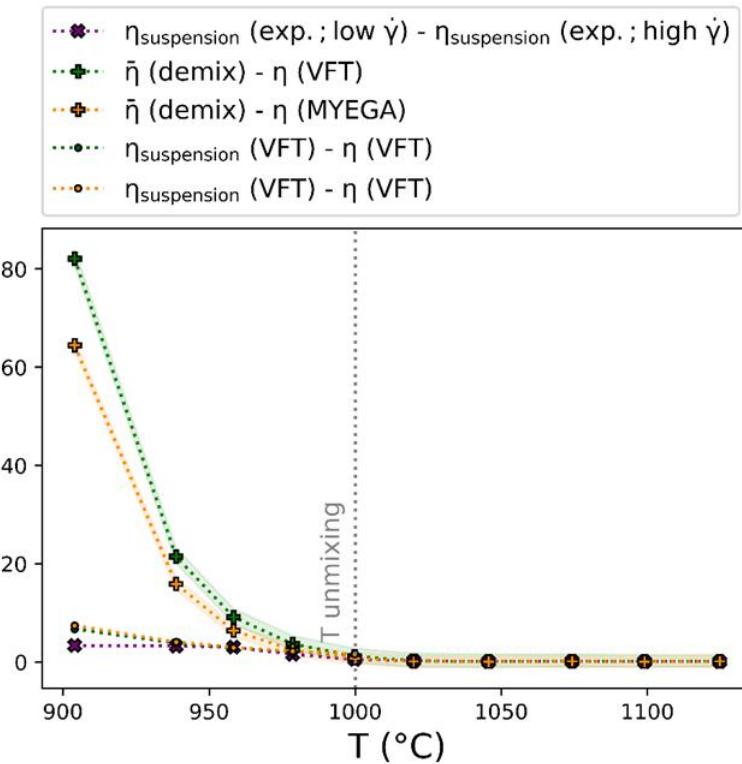
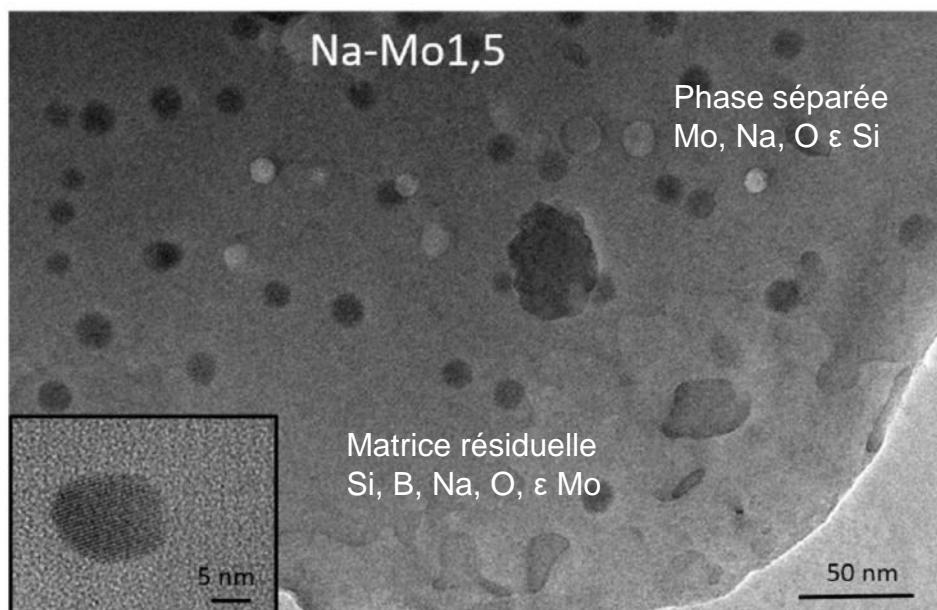
Etude du comportement rhéologique des verres contenant des phases séparées : Cas de $63\text{SiO}_2\text{-}17\text{B}_2\text{O}_3\text{-}19\text{Na}_2\text{O}\text{-}1,5\text{MoO}_3$ contenant des molybdates alcalins



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 du à la formation des unités 2Na^+ , MoO_4^{2-}
- Polymérisation du réseau silicaté
- Diminution des BO_4^-

Description de la cinétique de séparation de phase liquide-liquide obtenue par nucléation croissance de verres enrichis en MoO_3

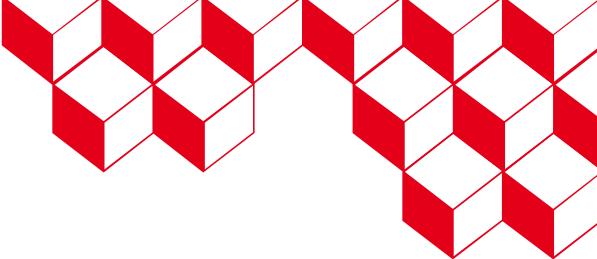
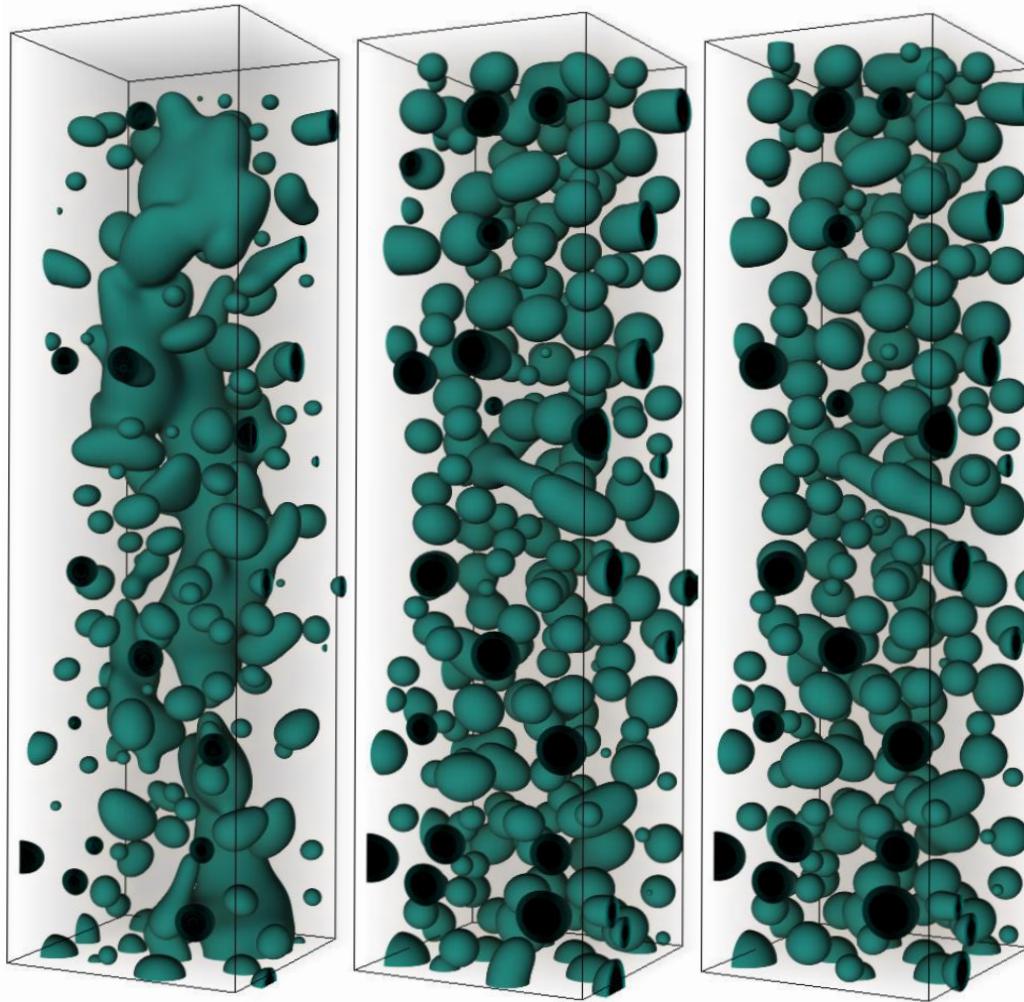
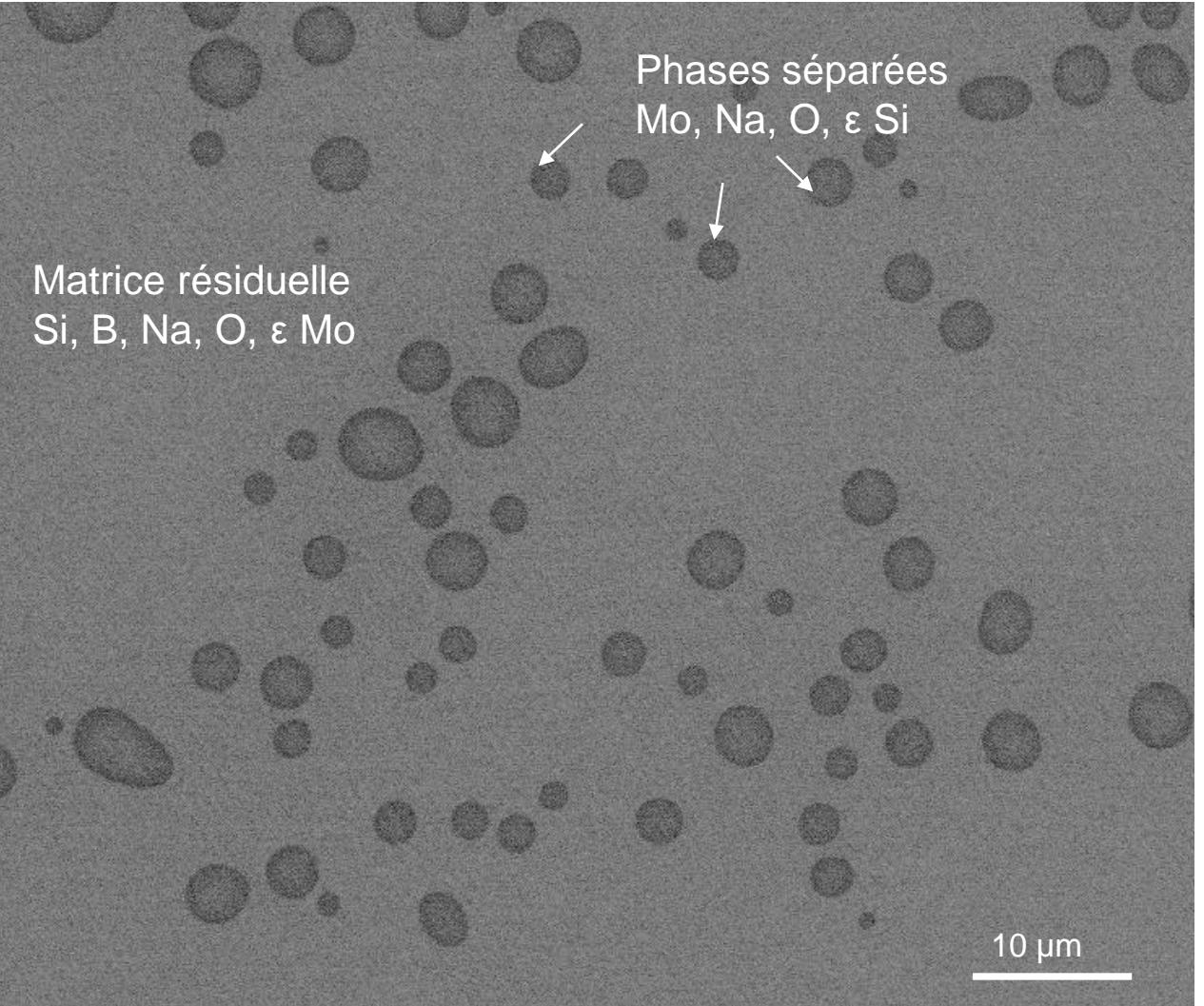
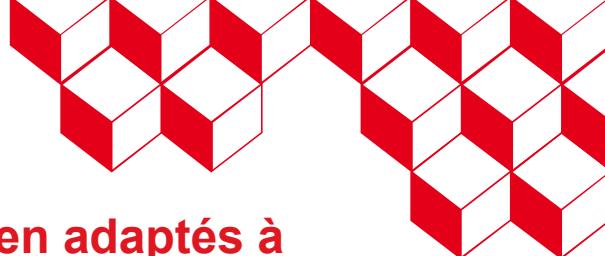


Image MEBE réalisée à 725 °C

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

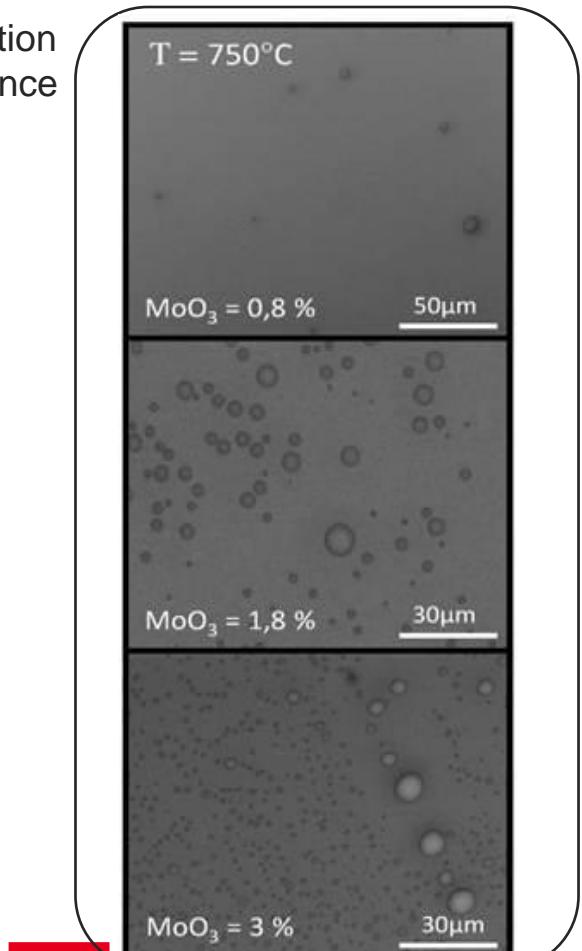


Développement d'un modèle à champ de phase pour prédire la cinétique de séparation de phase liquide-liquide de verres enrichis en MoO_3



Phénoménologie de la séparation de phase¹

Nucléation croissance



cea

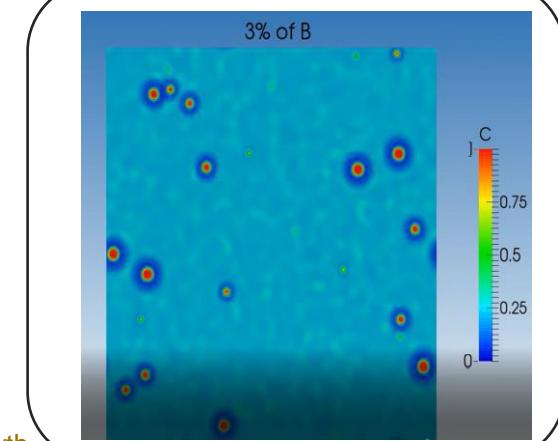
¹ S. Schuller: Chap4 - From glass to crystal - Nucleation, growth and phase separation: from research to applications 2017

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

Grand potentiel à champ de phase⁴
Couplé aux équations de Navier-Stokes

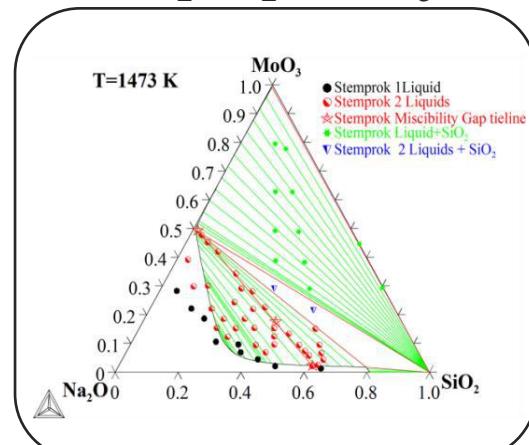
Open
CALPHAD

Résolution mathématique
Lattice Boltzmann³



Base de donnée
thermodynamique méthode
CALPHAD

$\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}\text{-MoO}_3$ ²



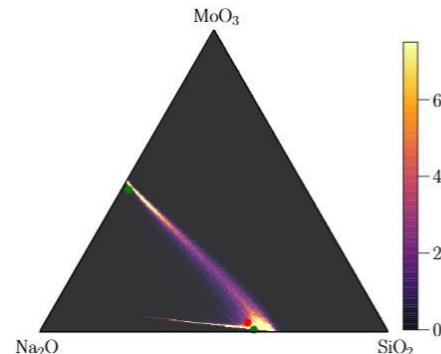
² Thèse Sébastien Bordier, Université Aix-Marseille University, 2015

HPC LBM_saclay³

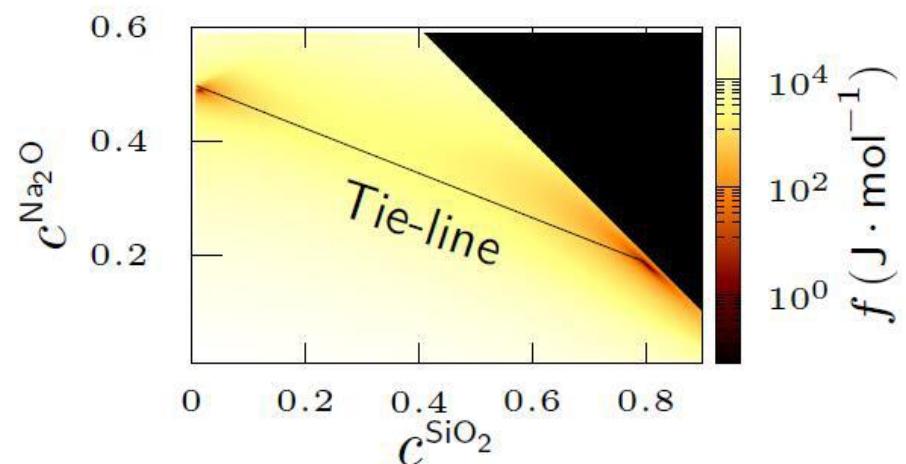
³ Mathis Plapp. "Unified derivation of phase-field models for alloy solidification from a grand potential functional." In: Phys. Rev 2011



Paysage thermodynamique



T° = 1152°C



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

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

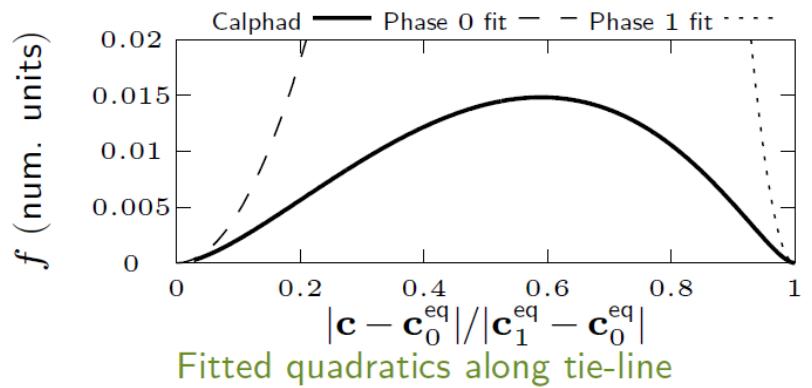
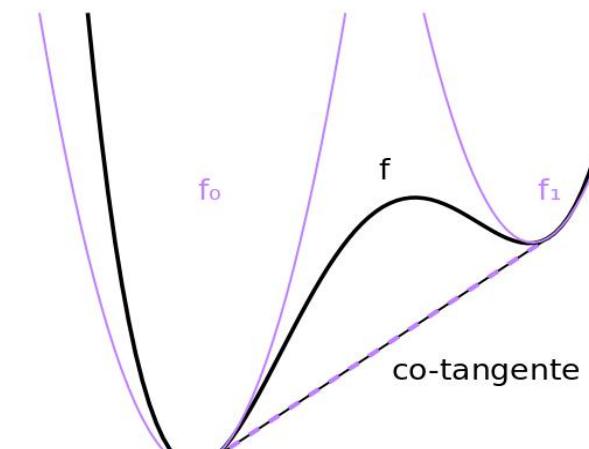
\mathbf{K}_i : Matrice de courbure liée à la dérivée seconde de f

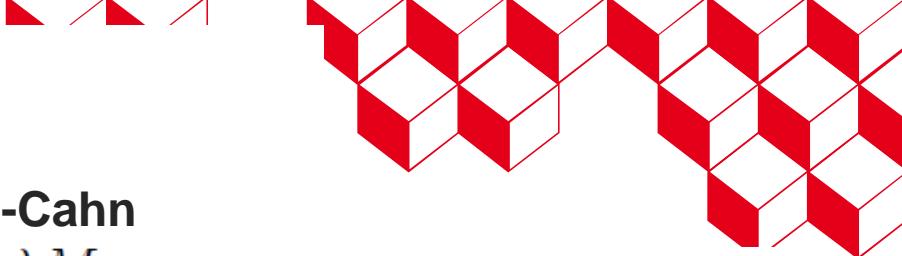
$\boldsymbol{\mu}$: Potentiel chimique local

φ : Variable de phase

$\mathbf{K}(\varphi)$ et $\mathbf{c}^{\text{eq}}(\varphi)$ interpolent les paramètres entre les deux phases

L'énergie de Gibbs associé à un double puits de potentiel est ajustée avec 2 fonctions hyperboliques (f_0, f_1) autour de chaque minimum





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

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

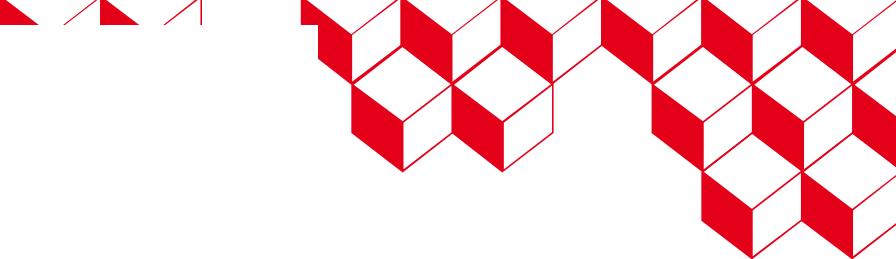
Symbol	English
φ	Phase-field – phase index between the liquid phases 0 and 1
M_φ	Mobility coefficient
λ	Thermodynamical coefficient of coupling
W	Interface width
ω_0	grand potential density of the first liquid phase)
ω_1	grand potential density of the second liquid phase
\mathbf{u}	mean fluid velocity (\mathbf{u} is computed by the NS equations)

Gradient de composition phase A and B

for $\alpha = A, B$

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

Symbol	: Description
c^A	: composition of A
c^B	: composition of B
\mathbf{M}^A	: diffusion coefficient of A
\mathbf{M}^B	: diffusion coefficient of B
μ^A	: chemical potential of A
μ^B	: chemical potential of B



Equation de Navier-Stokes

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

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

Symbol : Description

\mathbf{u} : fluid velocity

ρ : fluid density (interpolation of ρ_A and ρ_B)

p : pressure

ν : fluid viscosity (interpolation of ν_A and ν_B)

μ_φ : chemical potential of interface (depends on surface tension and curvature)



Résolution mathématique Lattice
Boltzmann

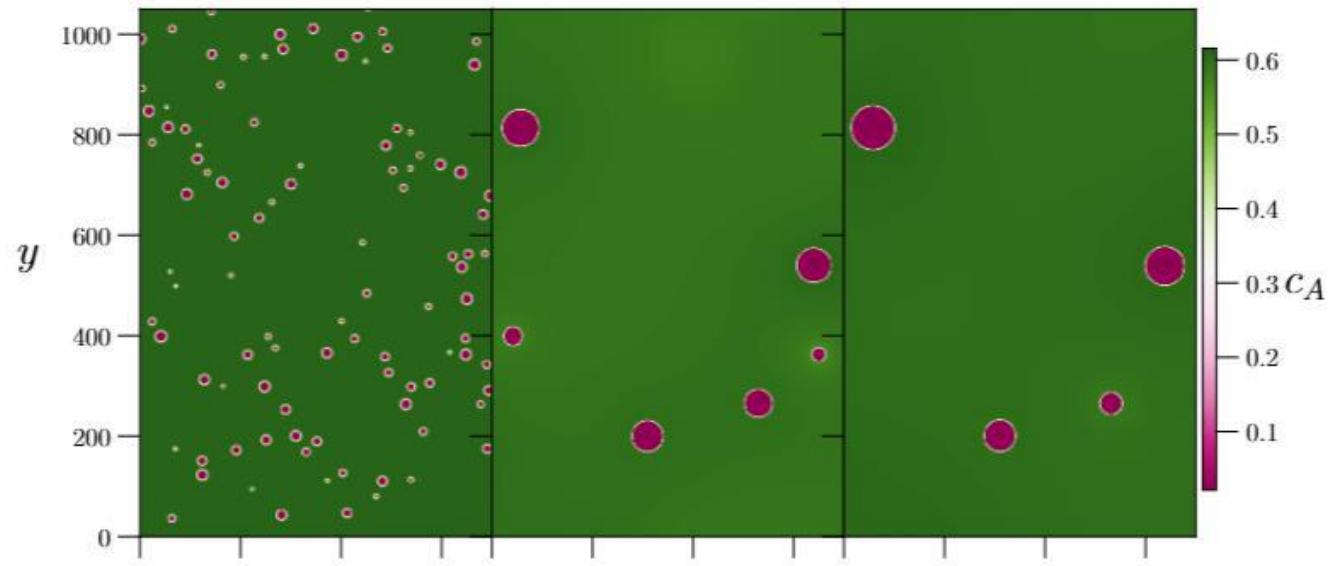


Résultats de simulation

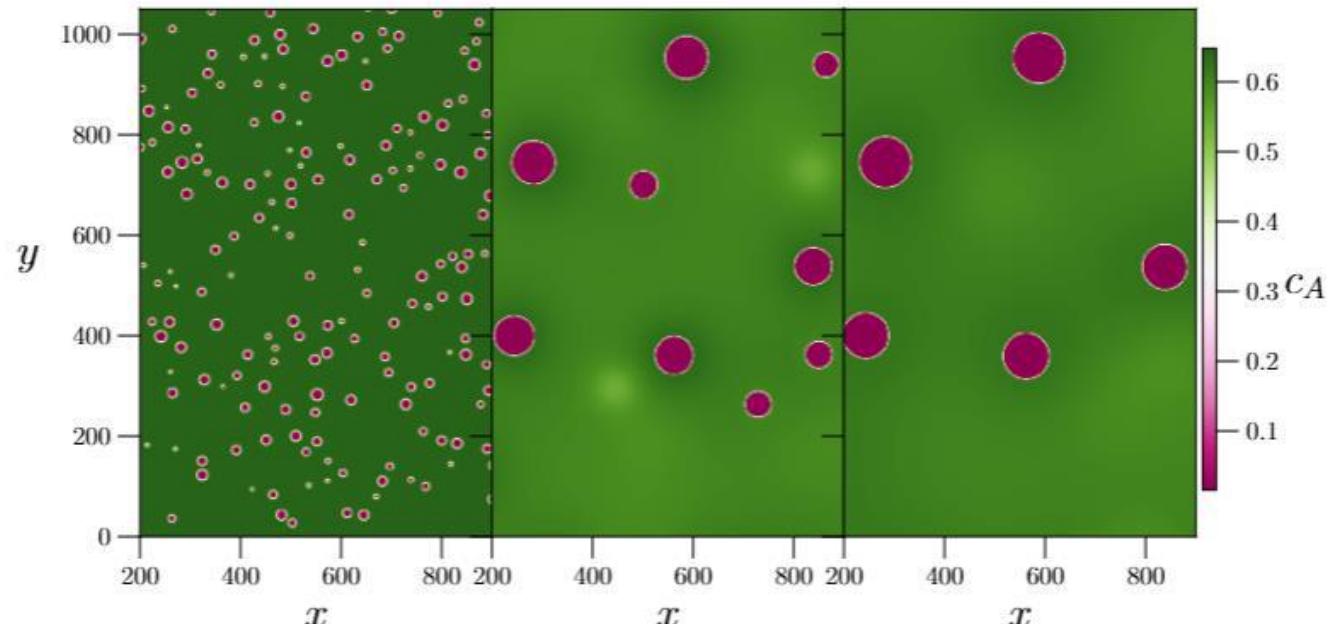
Résultats de simulations



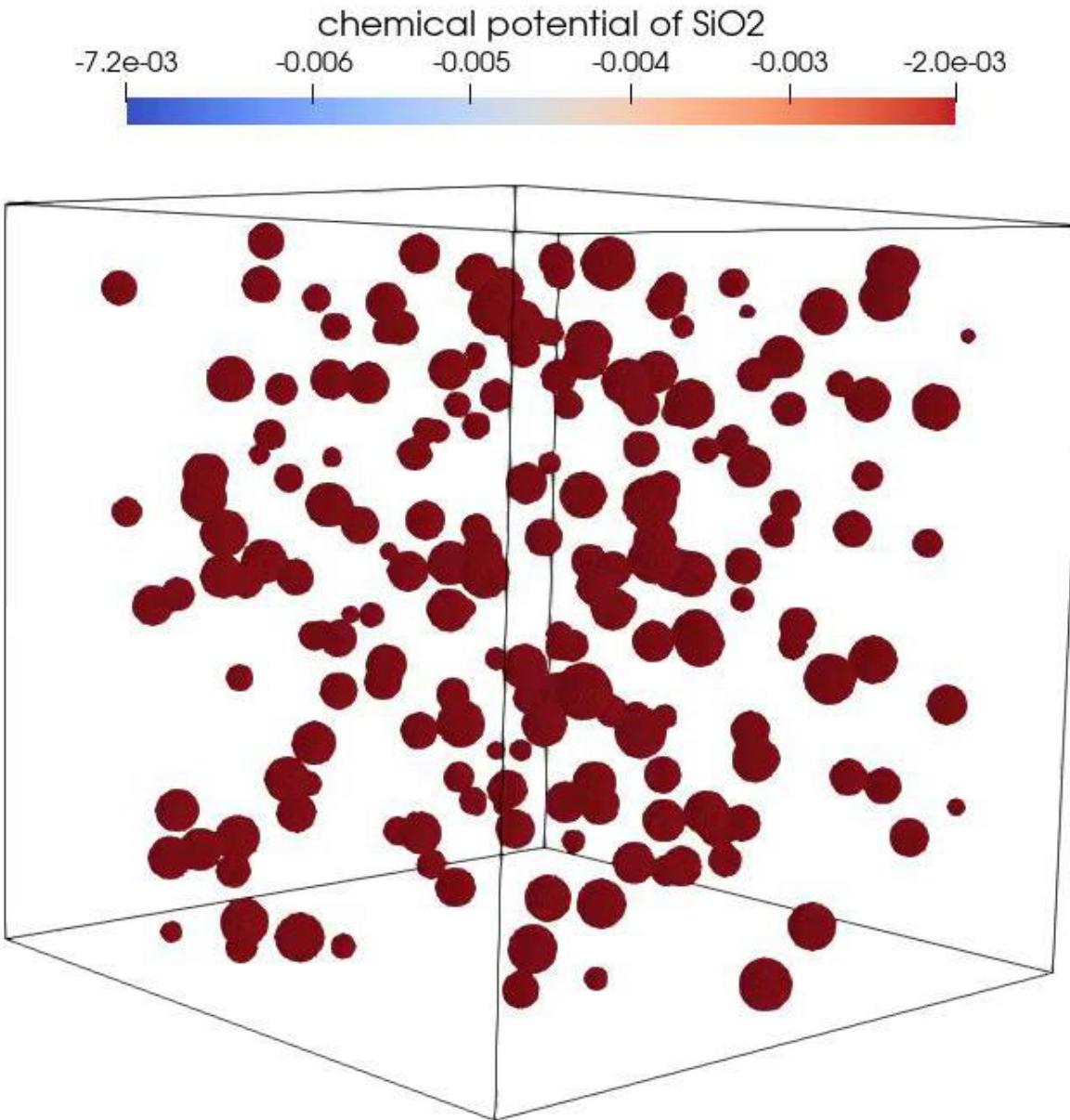
MoO₃ 2%



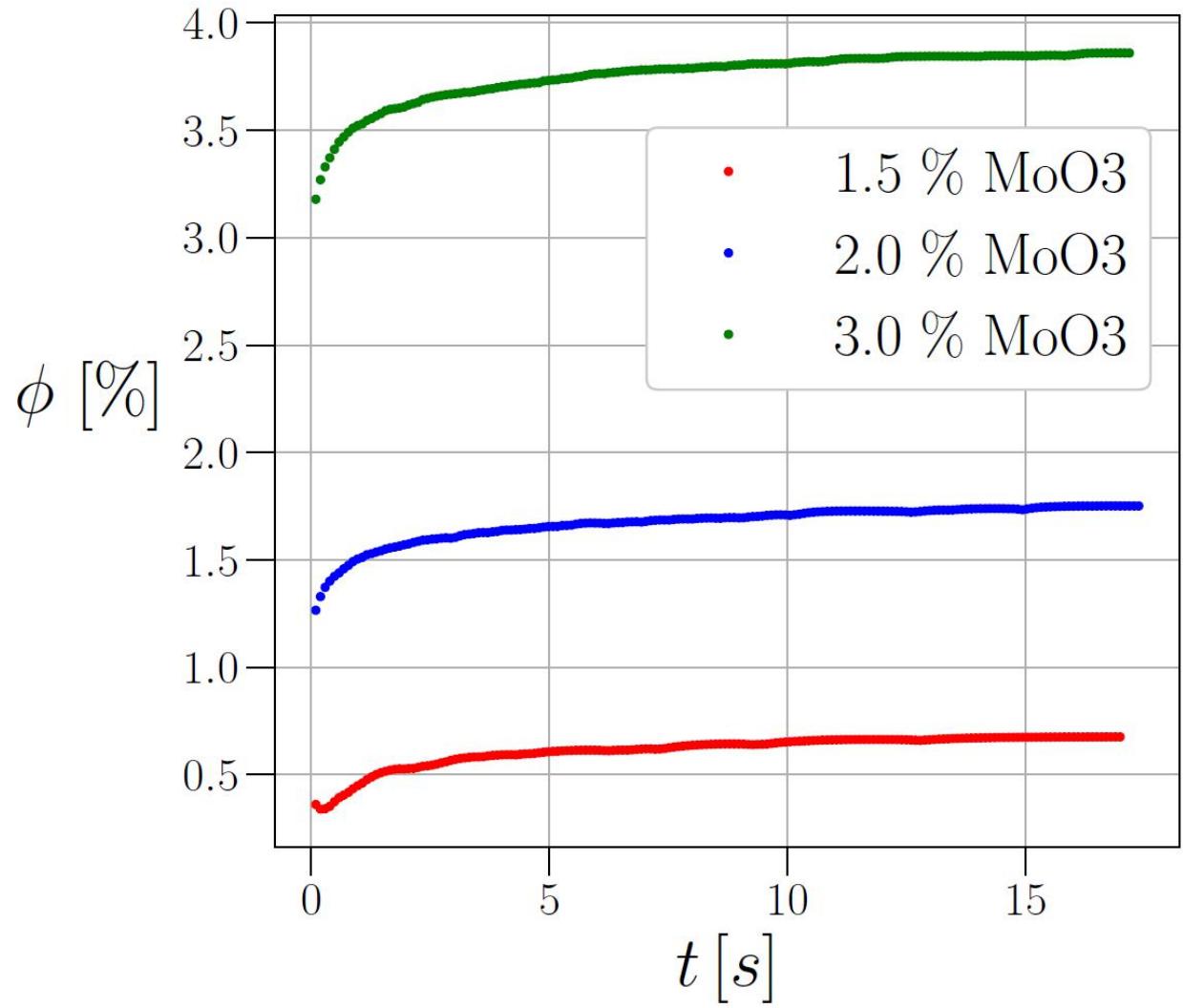
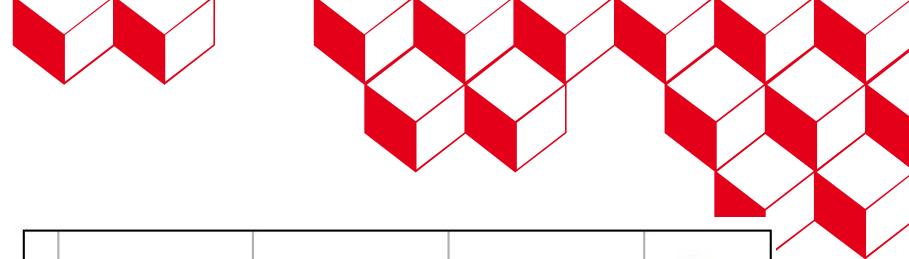
MoO₃ 3%



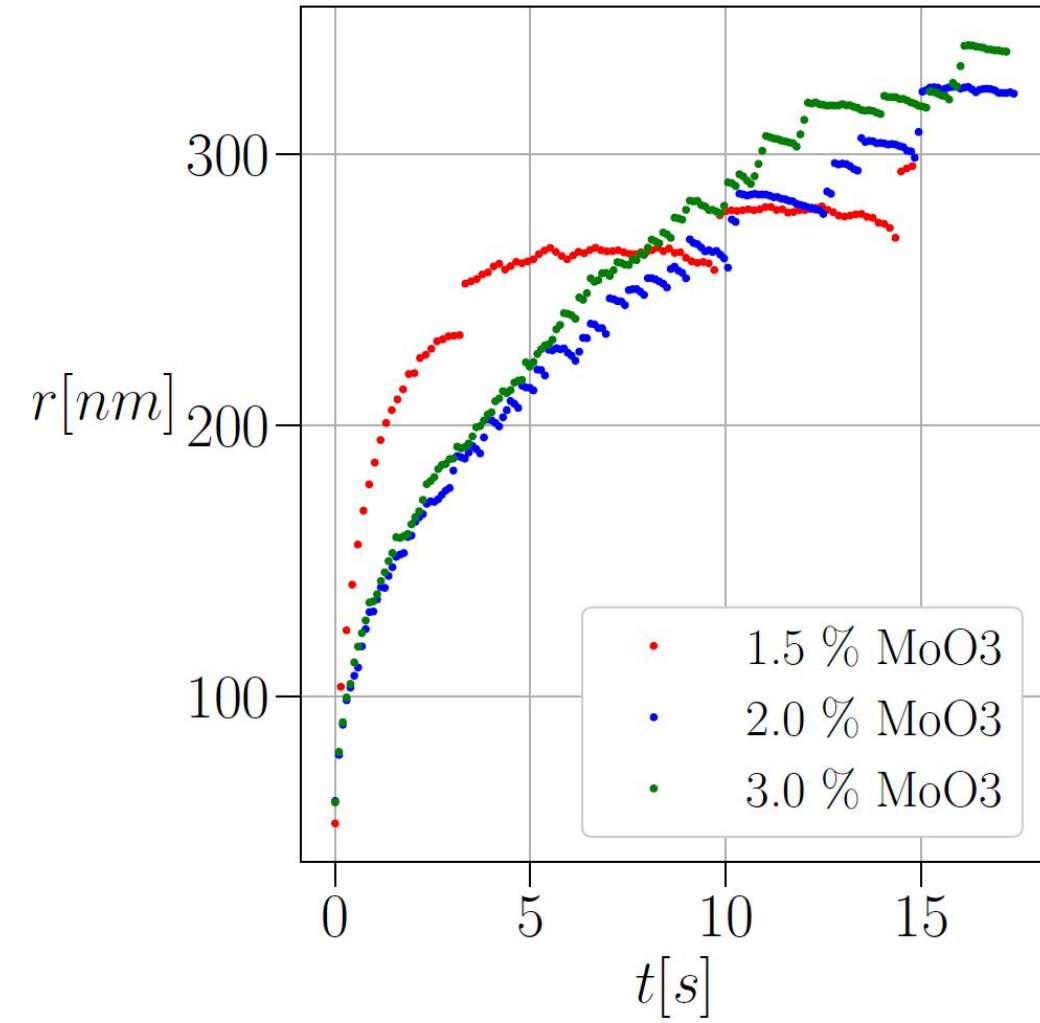
MoO₃ 3%



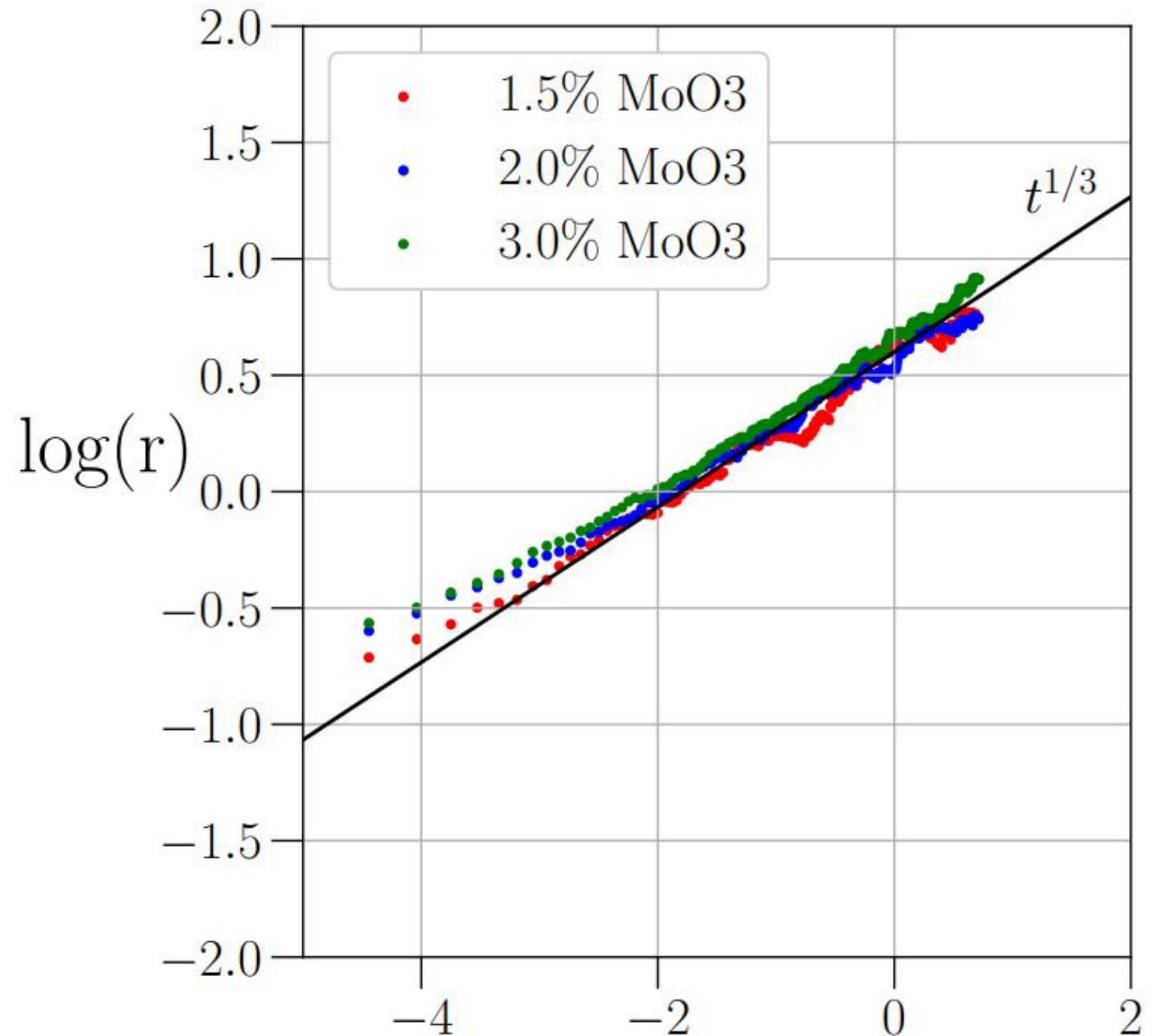
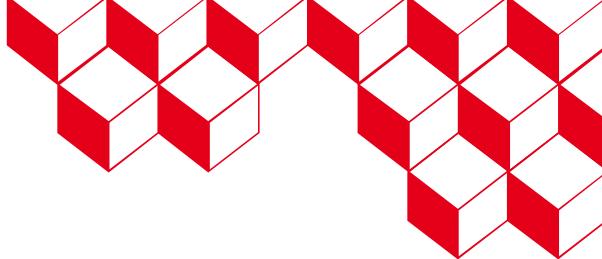
Quantification des phases séparées



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 enable 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



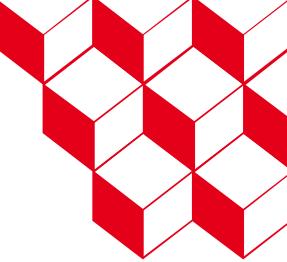
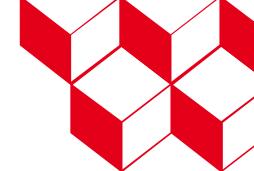
2027: South of France (CEA)

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/IRESNE Cadarache : Romain le Tellier

CEA/ISAS Saclay : Alain Cartalade, Capucine Méjanes

Institut polytechnique de Paris : Mathis Plapp

St Gobain SVI : Ekaterina Burov

Université Aix Marseille : Pierre Benigni, Jacques Rogez

Université Nancy GEMICO : Philippe Marchal

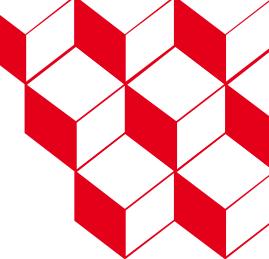
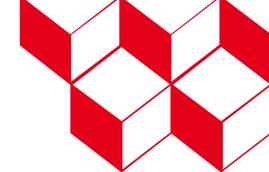
Institute of Rock Structure and Mechanics, Czech Academy of Sciences, Prague, République Tchèque : Jaroslav Klouzek

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

Concordia University Montréal : Adrien Donatini

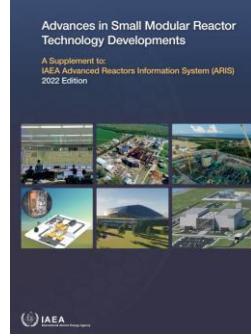
Department of Materials Science and Engineering, Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, Germany : Dominique de Ligny





Bibliographie

https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf



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