



INSTITUT
Mines-Télécom

Modélisation des procédés avancés de fabrication : Approches expérimentales et développements de la simulation. Application au procédé de frittage par chauffage micro-onde.

F. Valdivieso

Responsable du département MPE - Centre SMS
Laboratoire Georges Friedel - UMR 5307

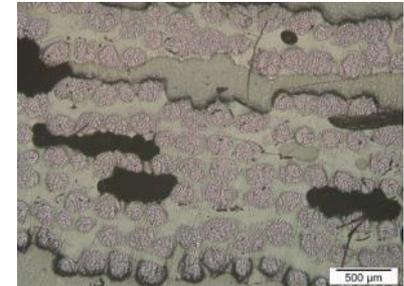
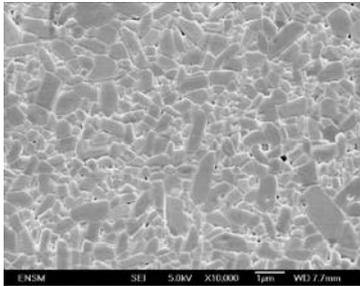




Plan de l'exposé

1. Présentation du département MPE Thématiques de recherches

Thématiques de recherches en MPE



Thème :

Contrôle des micro & méso-structures par les procédés d'élaboration directe

Nos activités :

- Métallurgie des poudres & multimatériaux – frittage micro-ondes
- Procédés par voie liquide pour les composites structuraux

Points forts :

Combinaison modélisation-simulation-expériences

- Convergence entre la mécanique et la science des matériaux
- Excellence et originalité des équipements et compétences dans le domaine expérimental (céramiques et composites)
- Multi-matériaux Céramiques-métal et composites structuraux architecturés
- Développement et mise en œuvre de méthodes numériques originales pour le couplage multi-physique, dans un contexte de calcul intensif



Plan de l'exposé

1. Présentation du département MPE
Thématiques de recherches
2. Chaire industrielle Hexcel de recherche & enseignement



Modélisation numérique avancée pour l'élaboration par infusion de composites structuraux de nouvelle génération



S. Drapier



J. Bruchon



P.-J. Liotier



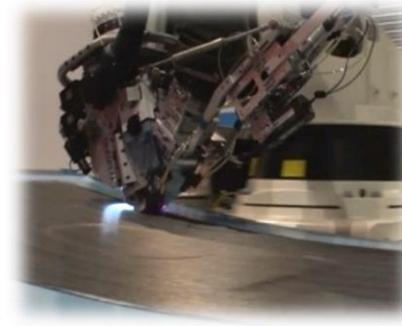
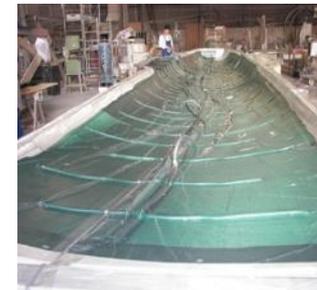
N. Moulin

Chaire industrielle Hexcel de recherche et d'enseignement : 2015-2020



Procédés Hors-Autoclave + placement de fibres

- > 53% composites (A350) ?
- 60 avions /mois ?



Sous le parrainage de

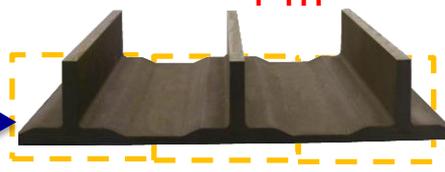


10⁻⁶ m

1 m

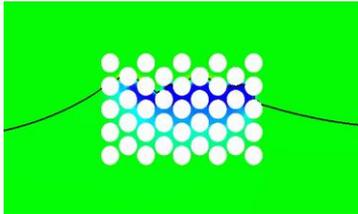
**Budget consolidé
> 2,2 M€ ≈ 20 homme.an**

+ **détachement** personnel Hexcel
+ **support technique** Hexcel process-carac

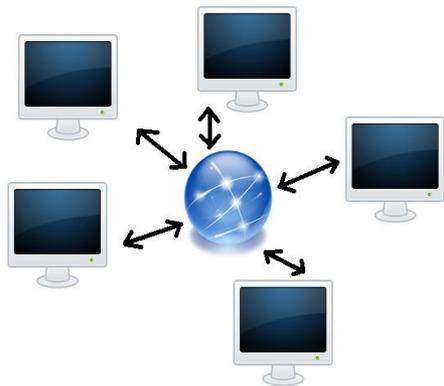


2017

VER micro
($\eta, \gamma_{SL}, \vec{X}, \dots$)

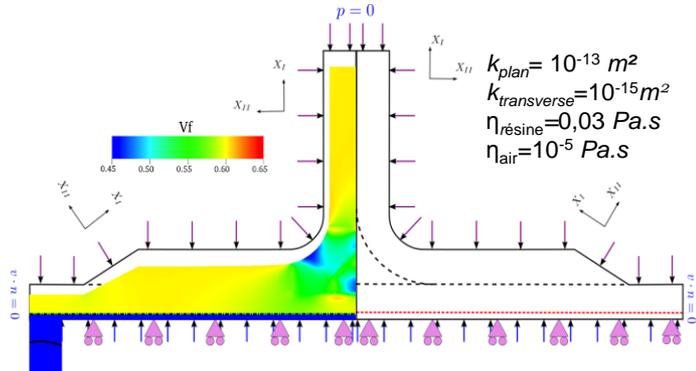


2019-2020



Clustering

2016



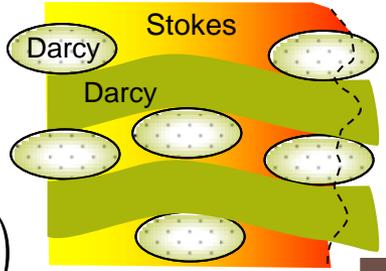
2017

Point de Gauss,
FE2, Arlequin, ...

2018

$$\underline{\underline{k}}(\vec{X}, s) = \left\langle \frac{\nabla P}{\eta \vec{v}} \left(\vec{X}, \gamma_{sl} \right) \right\rangle$$

VER meso
($\eta, \underline{\underline{k}}, \vec{X}, \underline{\underline{E}}, \dots$)

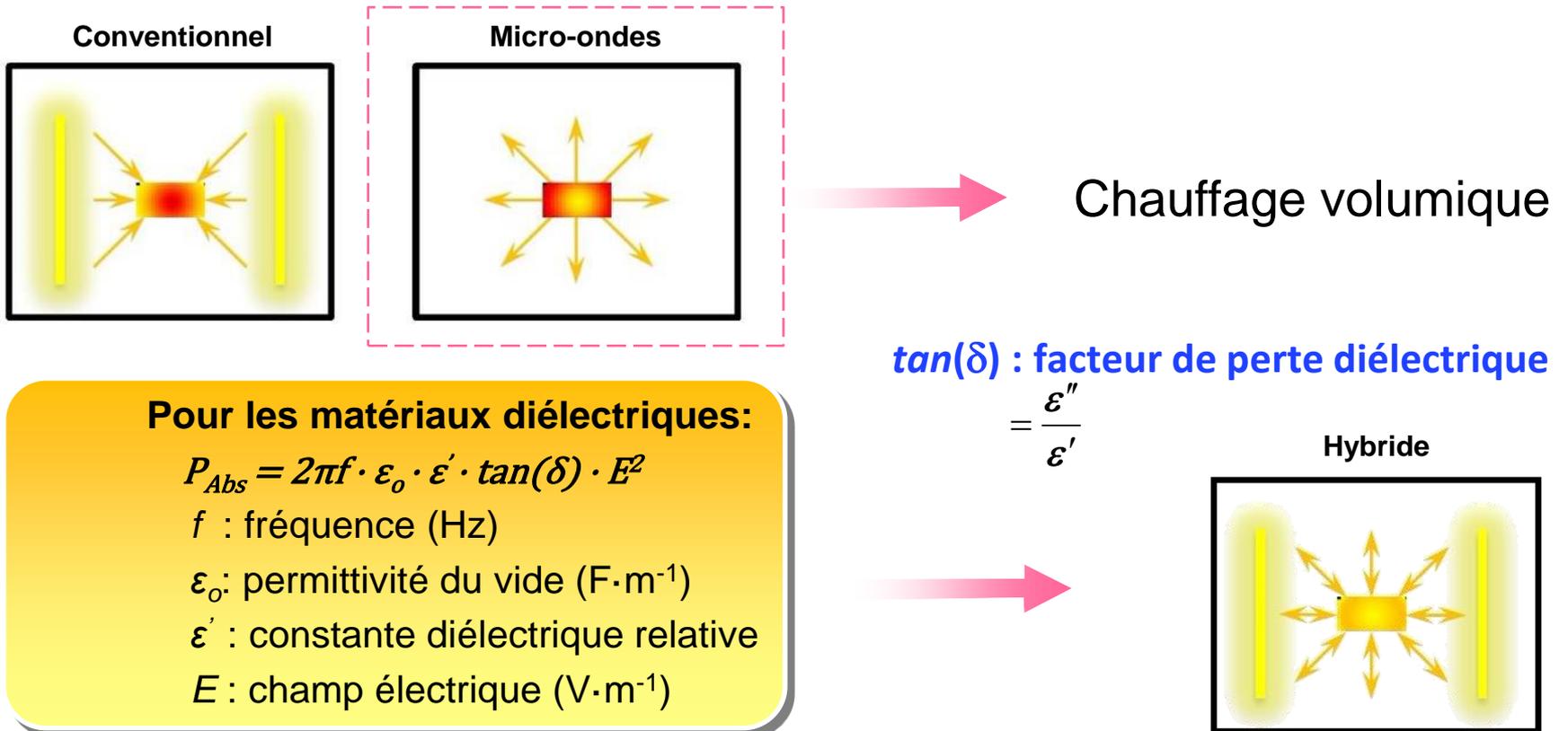


10⁻⁴ m

Plan de l'exposé

1. Présentation du département MPE
Thématiques de recherches
2. Chaire industrielle & enseignement Hexcel
3. Le frittage par chauffage micro-ondes
 - a. Interaction onde EM - matière
 - b. Développement d'un outil de suivi in situ
 - c. Modélisation expérimentale
 - d. Modélisation numérique

Interaction onde EM - matière



Energie ↓

Temps ↓

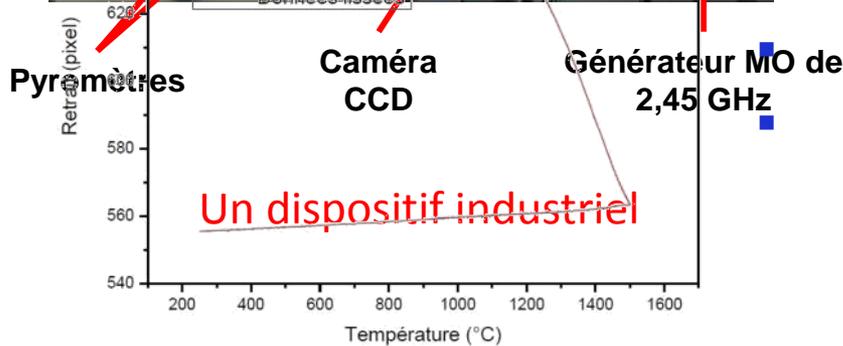
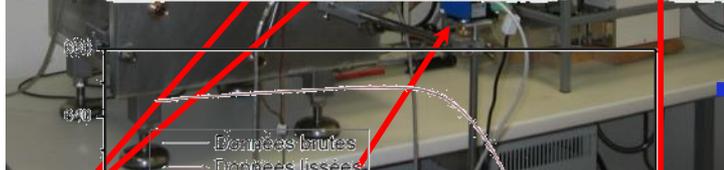
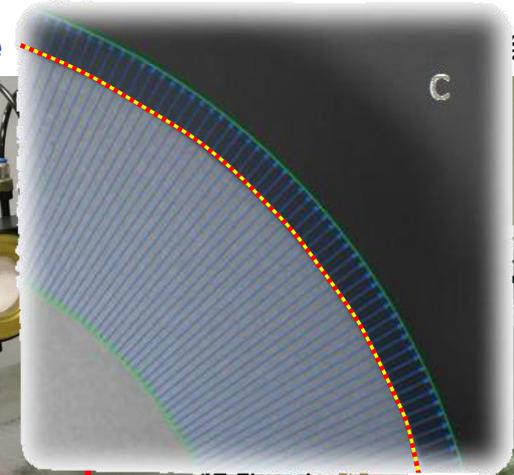
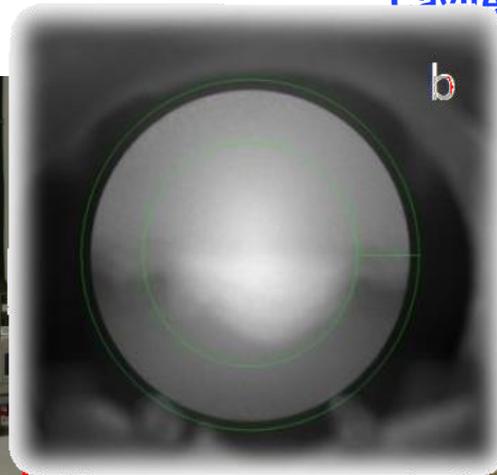
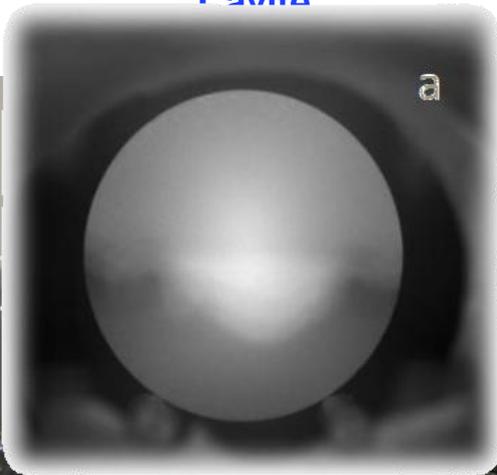
microstructure

Propriétés

Développement d'un outil de suivi in situ

Cavité

Cavité



Mesure sans contact : sans interférence avec le champ électromagnétique.

Mesure continue : étude dilatométrique.

Contrôle de la température par PID : permet d'appliquer des cycles identiques en frittage micro-ondes et en frittage conventionnel.

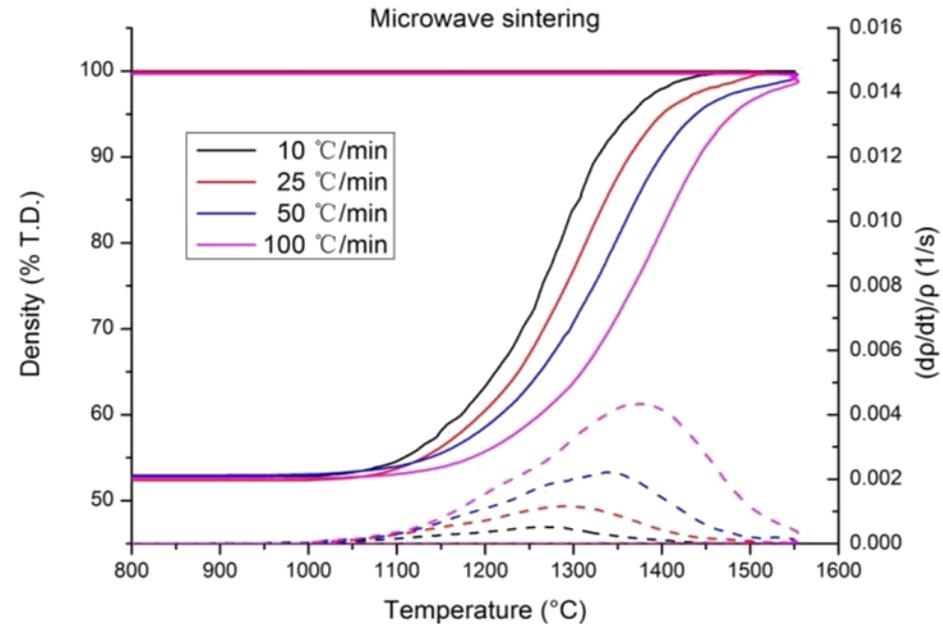
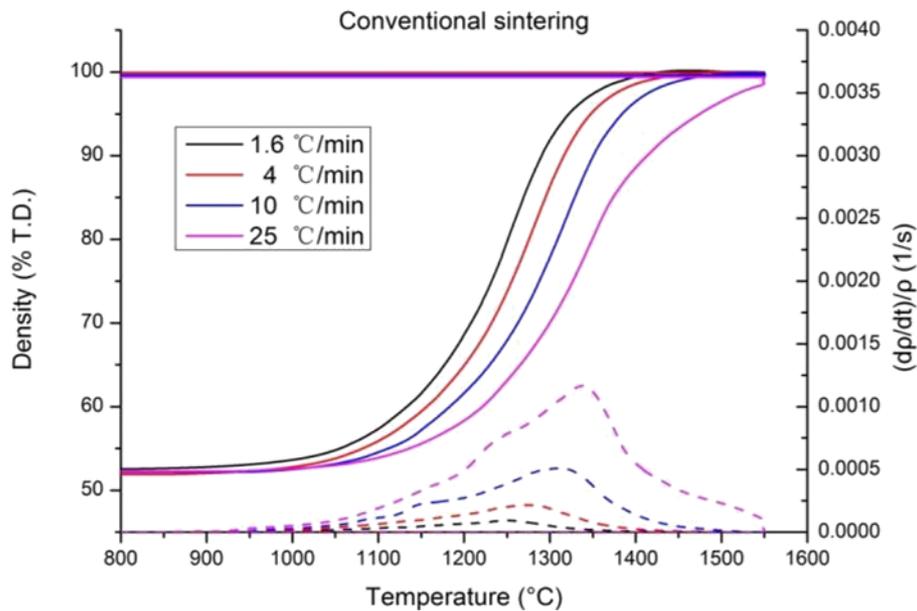
feuille semi-transparente

pyromètre

Un dispositif de laboratoire

Modélisation expérimentale

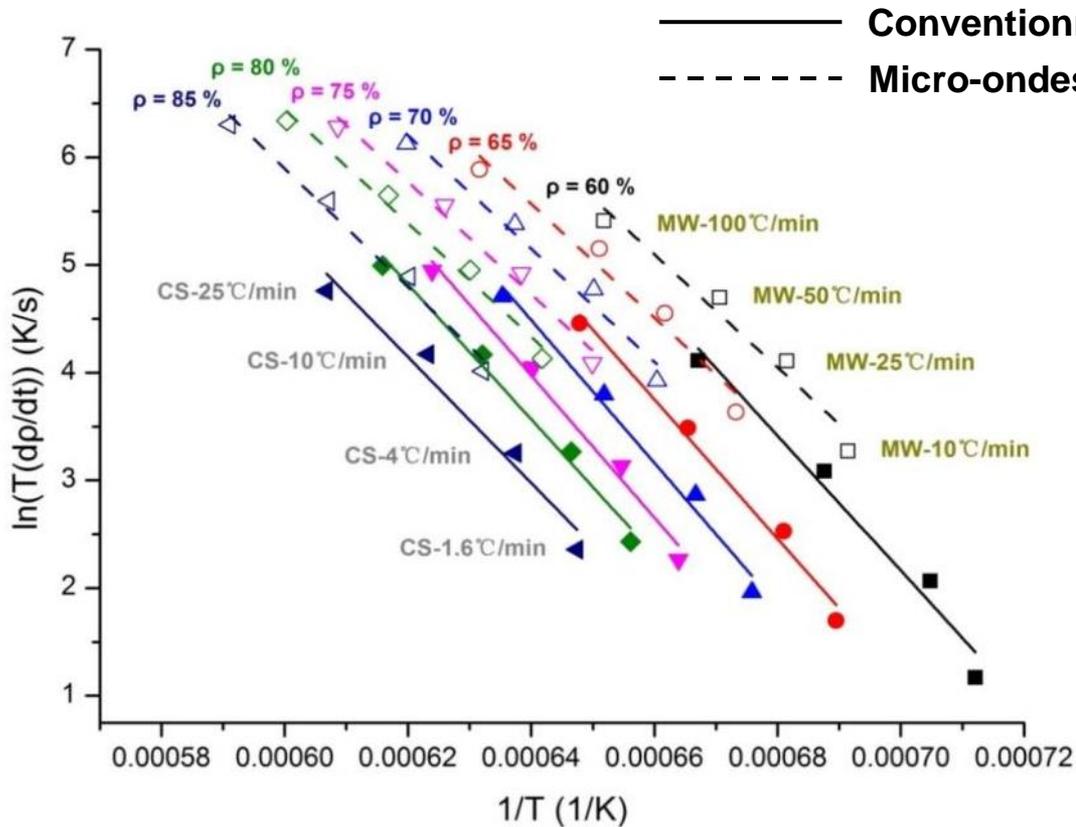
Cas de l'alumine



Etude de la densification et comparaison avec le frittage conventionnel

Modélisation expérimentale

Identification du mécanisme de frittage



← $\ln\left(T * \frac{d\rho}{dt}\right) = -\frac{E_a}{RT} + A$
 (A = constante)

$E_a(\text{MO}) = 440 \pm 8 \text{ kJ/mol}$; $E_a(\text{CV}) = 528 \pm 22 \text{ kJ/mol}$

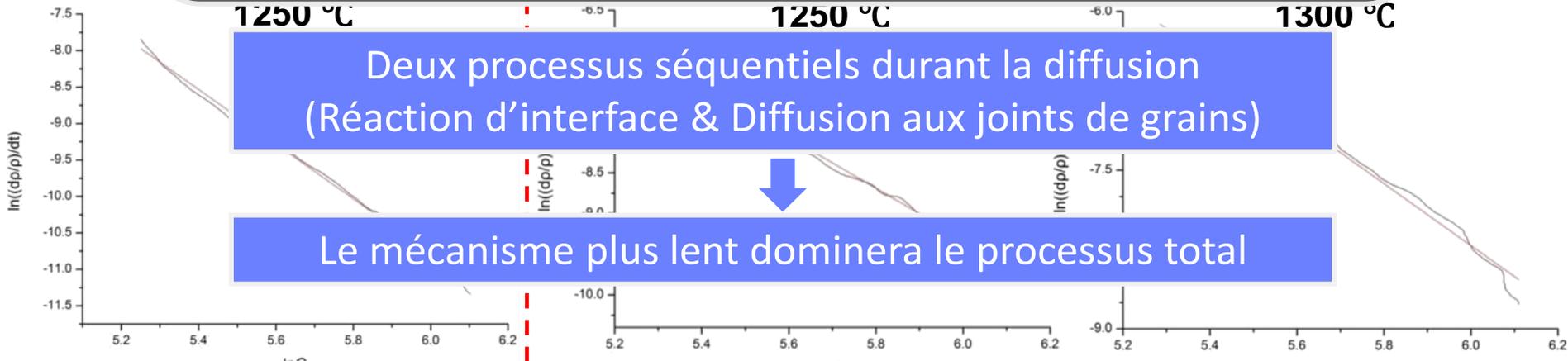
Modélisation expérimentale

Identification du mécanisme de frittage

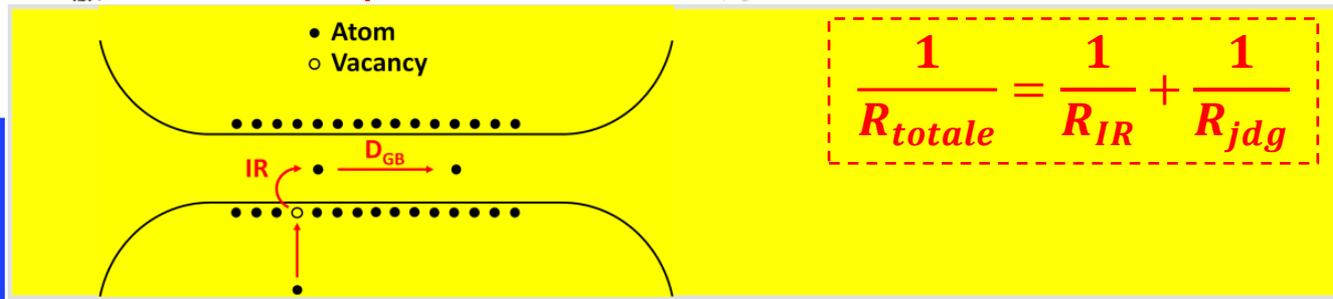
Réaction d'Interface + Diffusion aux Joints de Grains

Deux processus séquentiels durant la diffusion
(Réaction d'interface & Diffusion aux joints de grains)

Le mécanisme plus lent dominera le processus total



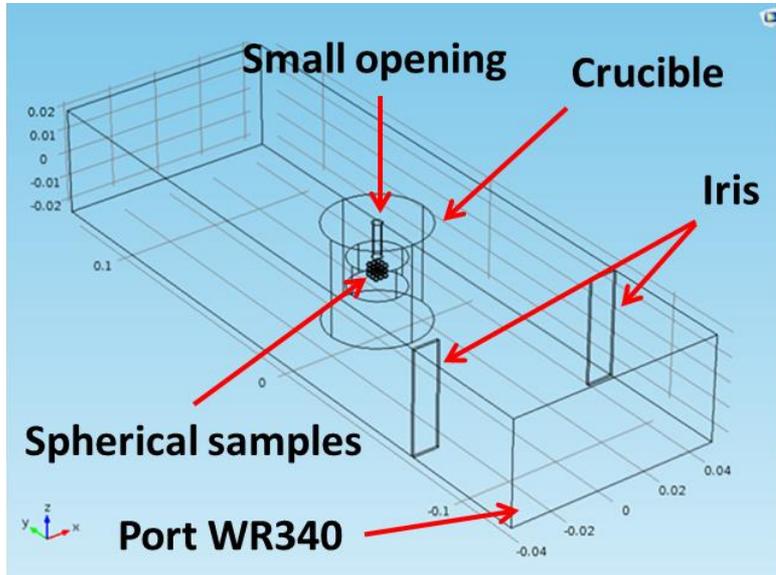
Modèle



Réaction d'Interface + Diffusion aux JdG

Modélisation numérique

couplage électromagnétisme- thermique



Cavité monomode de type TE₁₀₃
2.45 GHz.

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' |E|^2 \quad \text{Source de chaleur}$$

$$\nabla \left(\mu_r^{-1} \nabla E \right) - k_0^2 \left(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{\omega \varepsilon_0} \right) E = 0 \quad \text{Equation de propagation}$$

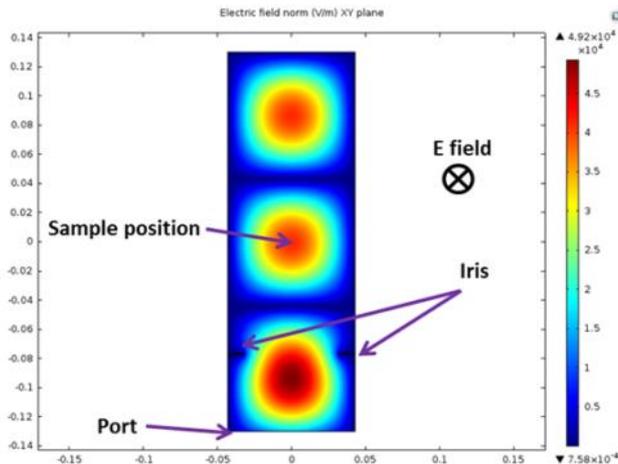
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_s \quad \text{Transfert de chaleur dans le solide}$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_f \quad \text{Transfert de chaleur dans l'air}$$

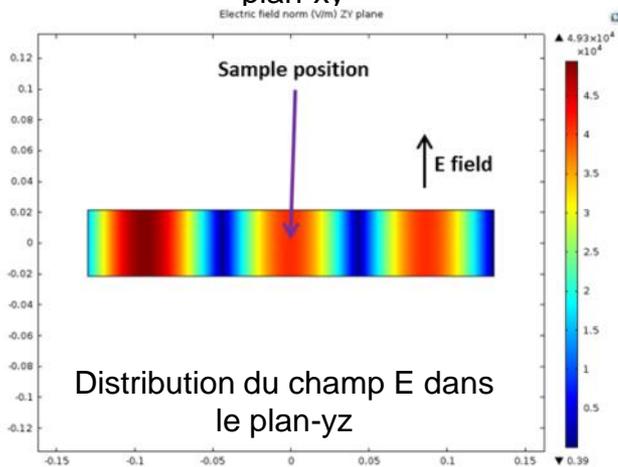
$$-n \cdot (-k \nabla T) = \varepsilon \sigma (T_{amb}^4 - T^4) \quad \text{Pertes thermiques par radiation}$$

Modélisation numérique

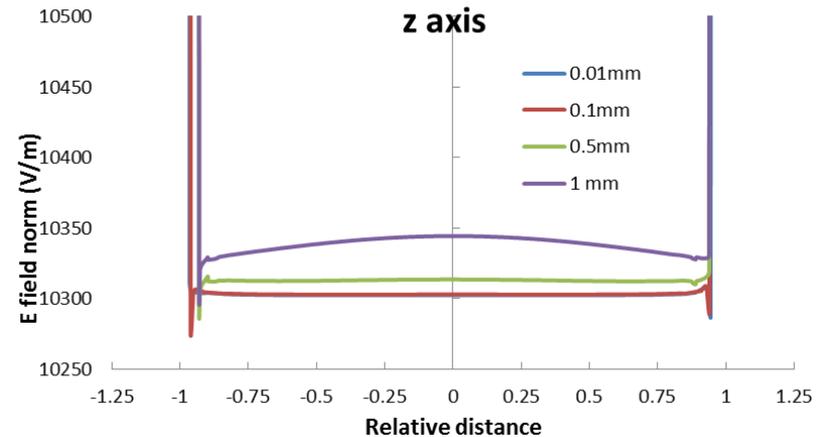
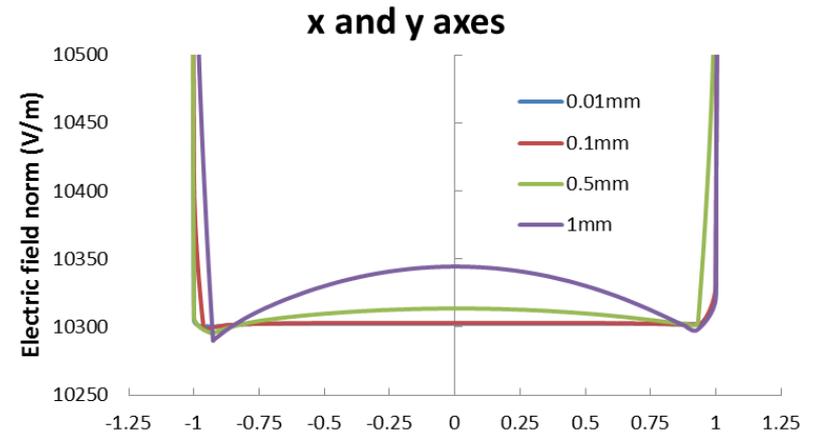
Cas d'une sphere de rayon variant de 0.01 à 1 mm



Distribution du champ E dans le plan-xy



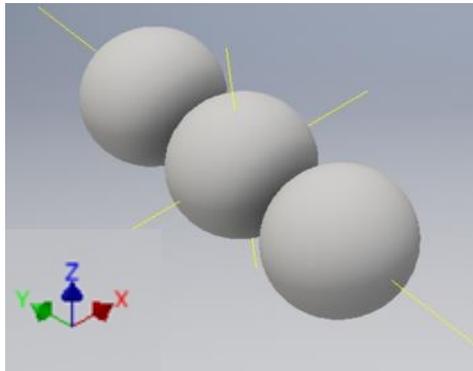
Distribution du champ E dans le plan-yz



Faible variation du champ E

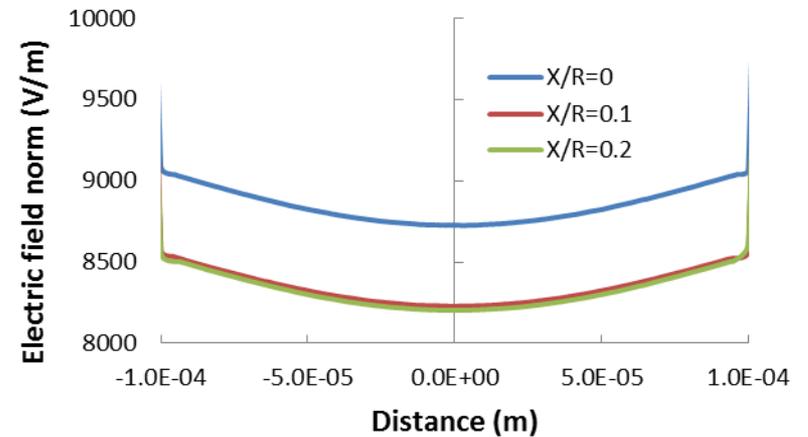
Modélisation numérique

Cas de 3 spheres de rayon variant de 0.1 mm

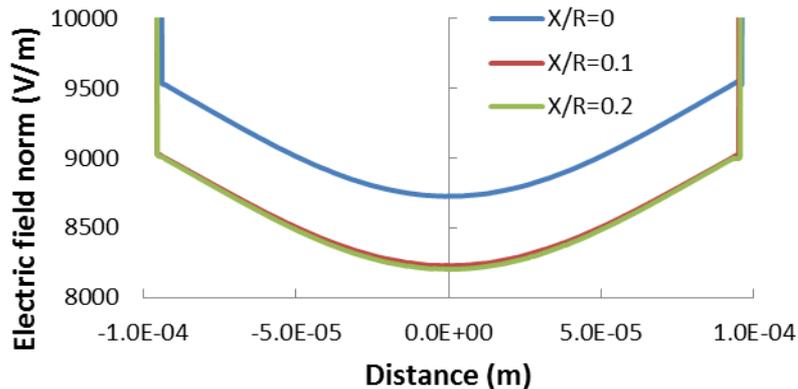


E-field // axe-z et \perp plan-xy

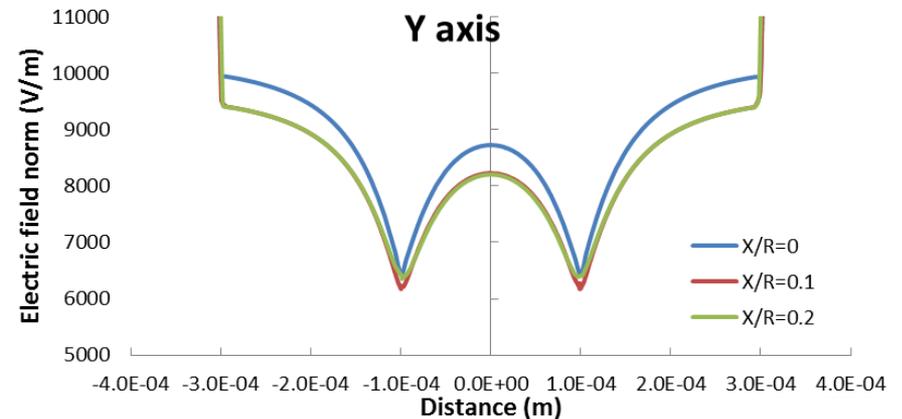
X axis



Z axis

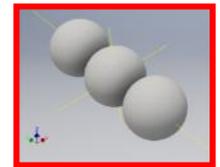
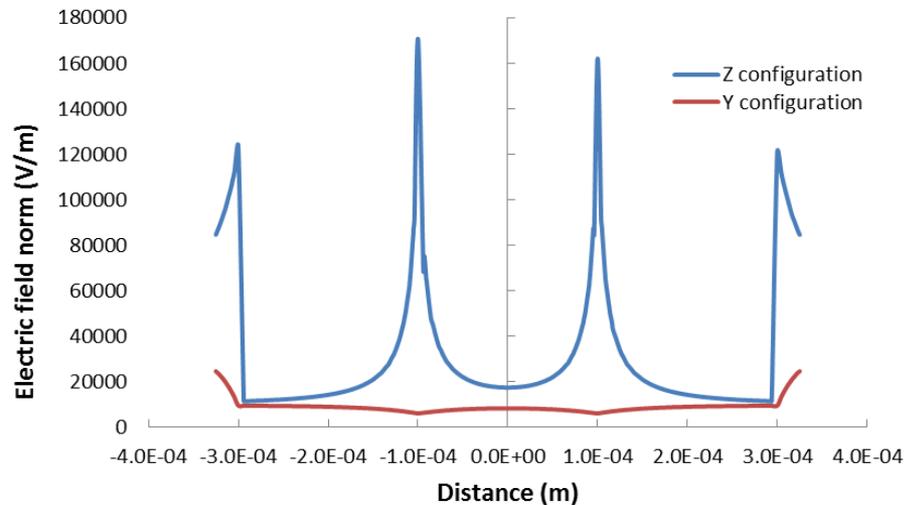
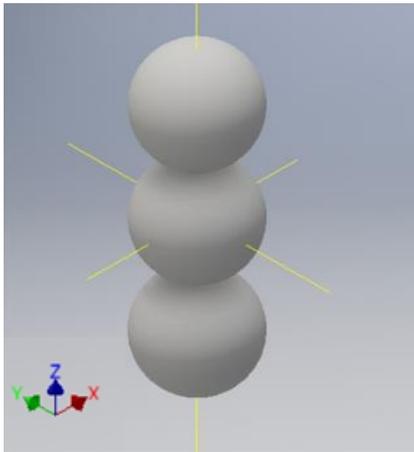


Y axis



Modélisation numérique

Cas de 3 spheres de rayon variant de 0.1 mm

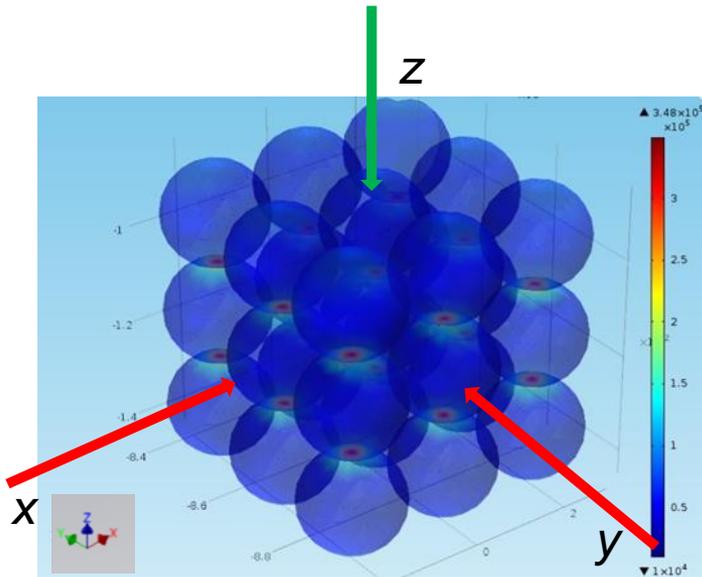


E-field // axe-z et \perp plan-xy

- Le champ électrique le long de l'axe-z dans la configuration Z est plus intense.
- Le champ électrique est beaucoup plus intense à proximité du cou entre les particules

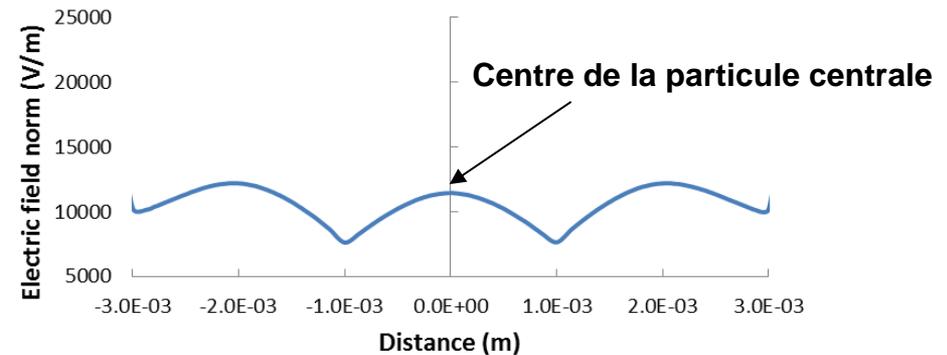
Modélisation numérique

27 sphères d'un rayon de 1 mm

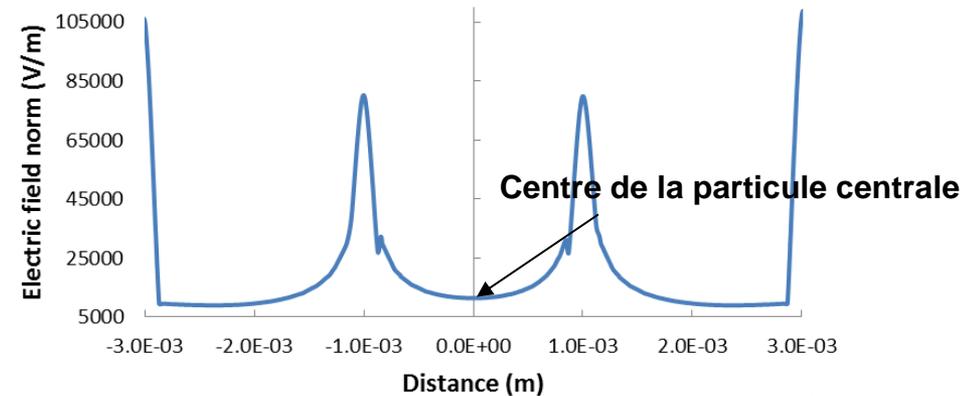


- E est plus intense dans les joints de grains \in au plan $(xy) \perp E$
- Les phénomènes de transport aux jdg et en surfaces seront les plus affectés
- Densification anisotrope due à l'effet de l'orientation d'un empilement par rapport au champ

x and y axes

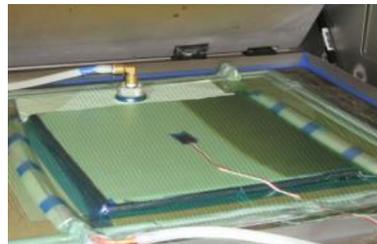


z axis



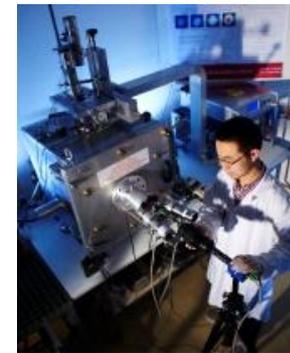
Conclusion – Méthodologie générale

Objectif : Comprendre le rôle des paramètres physiques pour la maîtrise des micro & méso-structures élaborées par les procédés d'élaboration directe.



Elaboration

Contrôle des
procédés



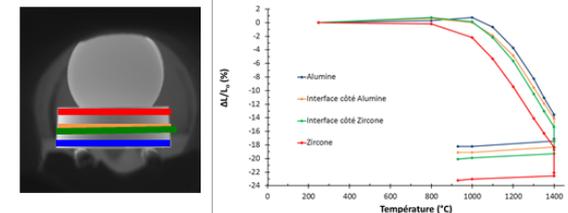
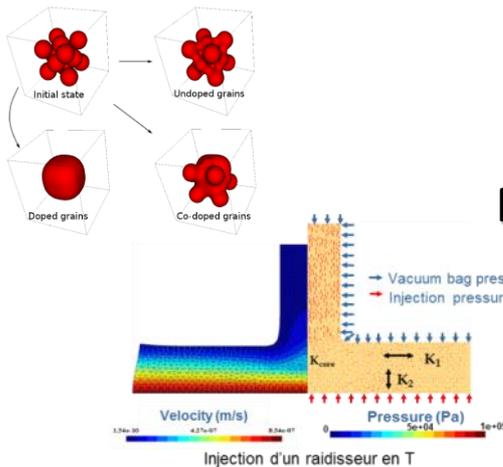
Suivi in-situ

Energie

Transport

Modélisation /
Simulation

Caractérisation



Bi-matériau Alumine – Zircon
Calculs EF (densification-mé
→ contraintes internes

Conclusion

■ Intérêts & Développements industriels

- Infiltration-réaction pour la synthèse de composites carbure de bore-carbure de silicium par micro-ondes. (DGA)
- l'assemblage multimatériaux céramique-verre-céramique par micro-ondes, pour l'enfouissement des déchets nucléaires HA. (Andra)
- Elaboration du combustible nucléaire – réactivité solide- solide, (CEA)

2 posters :

Vers la maîtrise des procédés hors-autoclave pour des (Bio)-composites structuraux . P-J. Liotier

Traitements thermiques par micro-ondes : Quelle aventure ! F. Valdivieso