

Utilisation des images 3D pour la caractérisation des propriétés physiques des matériaux

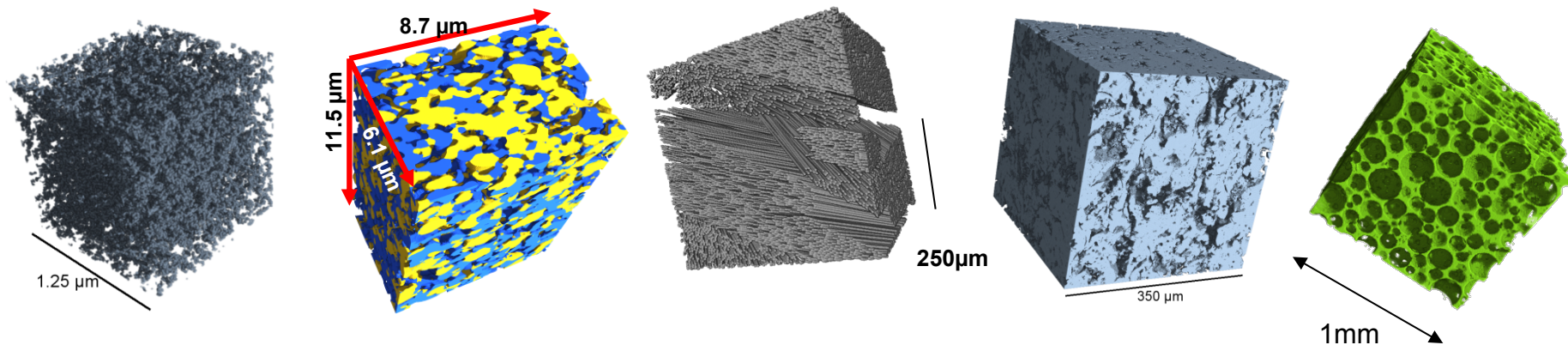
Denis Rochais, Sylvain Chupin, Amaury Walbron

CEA Le Ripault

denis.rochais@cea.fr

Déterminer les propriétés thermiques (conductivité, diffusivité) et/ou le comportement thermique de matériaux de plus en plus complexes de part:

- leur nature hétérogène (***multiconstituants***)
- leurs échelles spatiales caractéristiques (***du nm au mm***)
- les transferts thermiques couplés en leur sein



Dans quels buts ?

- Comprendre l'impact d'un procédé d'élaboration sur les propriétés
- Aider au choix des constituants de base d'un matériau hétérogène
- ...

⇒ Orienter la conception et l'élaboration afin d'optimiser les performances thermiques des matériaux

Constat: très grande variété de matériaux de différentes natures

⇒ Nécessité de disposer de techniques de caractérisation performantes et adaptables aux contraintes matériaux (échelles caractéristiques, anisotropie de comportement, propriétés à très haute température...)

1- Réponse expérimentale (RE)

⇒ le développement de techniques non intrusives basées sur l'interaction laser/matière, appelées « photothermiques », permettant de mesurer la **diffusivité thermique** à différentes échelles spatiales et à très haute température

2- Réponse théorique (RT)

⇒ modélisation du transfert thermique au sein de microstructures numérisées (en complément des études expérimentales parfois difficiles voire impossibles à réaliser) permettant:

- ⇒ de réaliser des expériences numériques pour calculer les **conductivité et diffusivité thermiques**,
- ⇒ de réaliser des études paramétriques (sensibilité à la nature des constituants, à des paramètres géométriques...)
- ⇒ d'étudier le comportement thermique de milieux hétérogènes

**N.B.: RT « alimentée » par les mesures des propriétés des constituants de base issues de RE
⇒ RT et RE indissociables**

SOMMAIRE



Mesure des propriétés thermiques

- caractérisation de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique (méthodes photothermiques)

Modélisation des propriétés thermiques

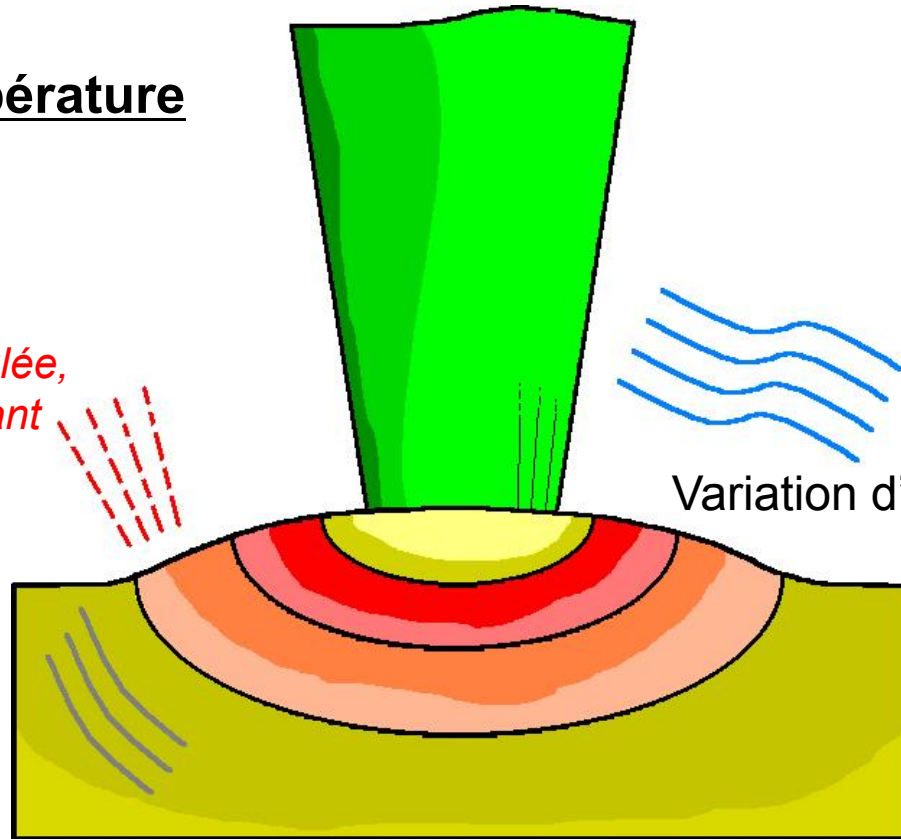
- présentation de la démarche
- exemples d'applications

Mesure des effets secondaires produits par l'absorption d'un faisceau laser instationnaire (impulsionnel ou périodique)

Élévation de température

Emission IR

*(Radiographie IR stimulée,
Méthode flash face avant
ou arrière)*

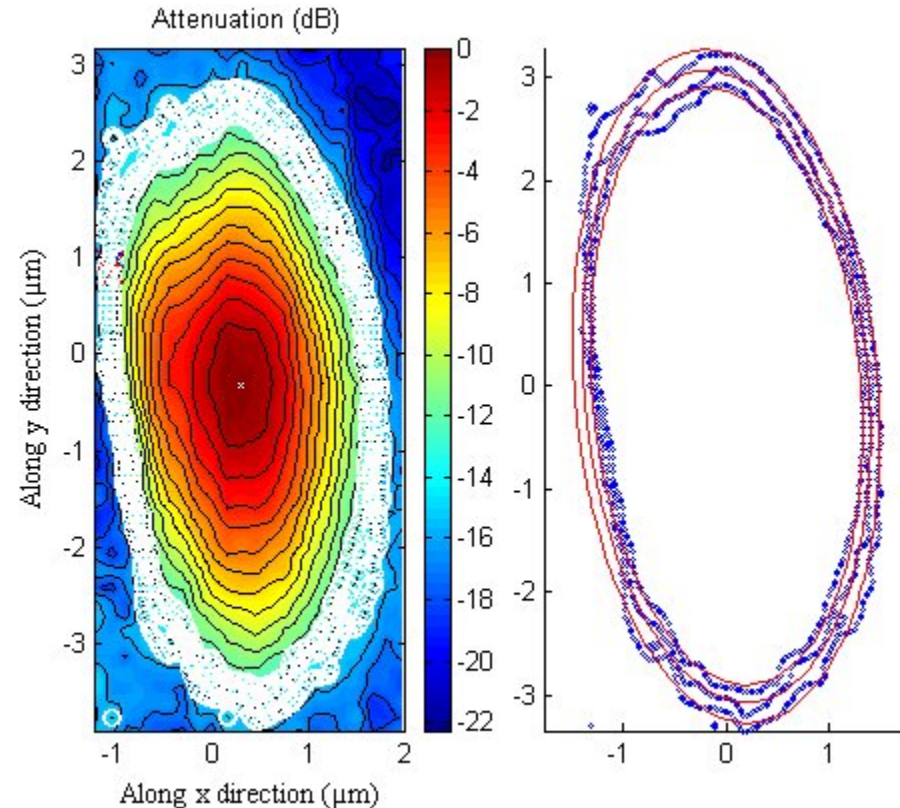
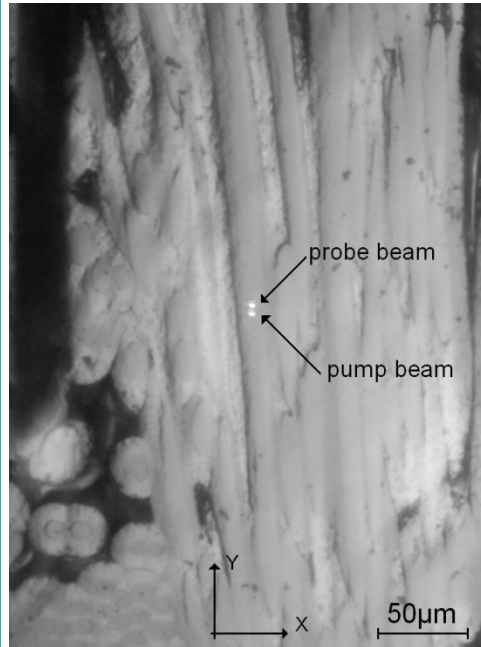
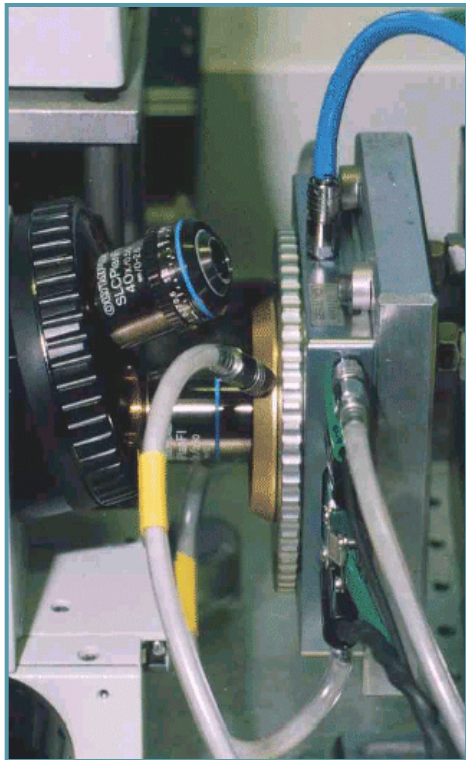


Variation d'indice

- Milieu environnant
 - Échantillon
- (effet mirage,
Phtoréflexion)*

Caractérisation de l'échelle du μm au mm

1. Dispositif de mesure à haute température ($\rightarrow 1500^{\circ}\text{C}$)
2. Photo de la zone sondée à la surface de l'échantillon à 1000°C .
3. Lignes d'iso-amplitudes avec leur ajustement théorique obtenus à 1000°C .

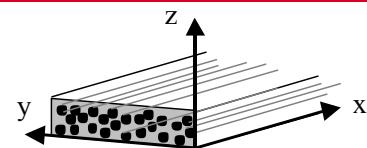


D. Rochais and al, J phys. D: Appl. Phys. 38 (2005) 1498-1503

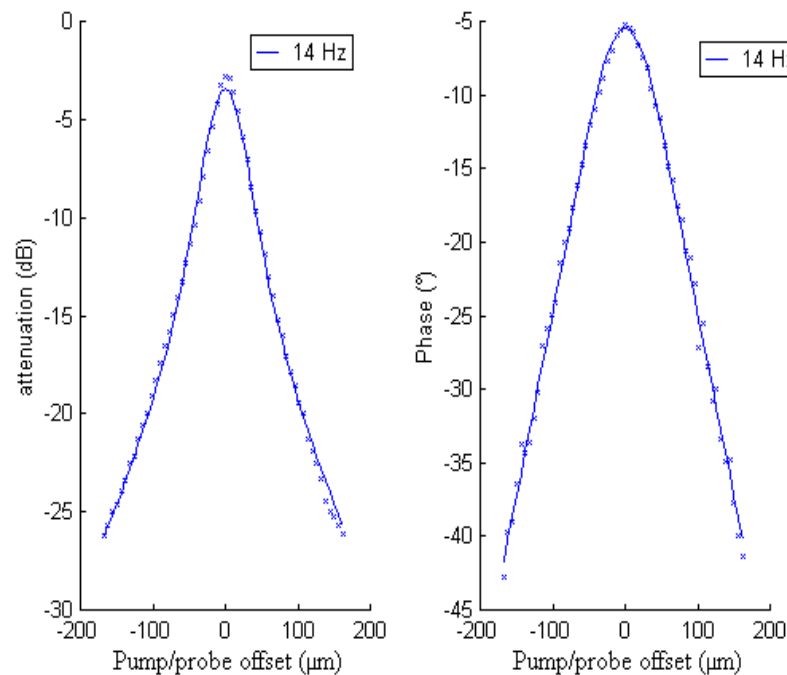
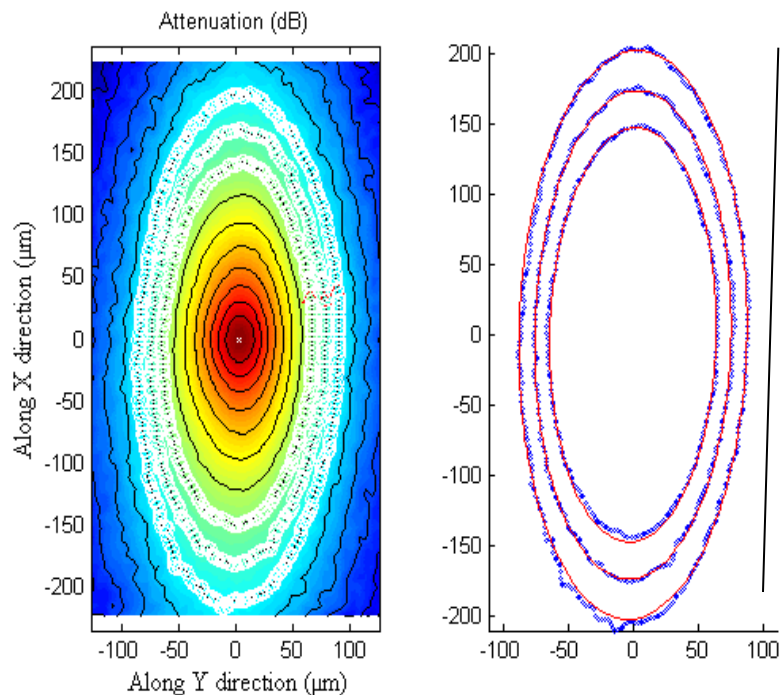
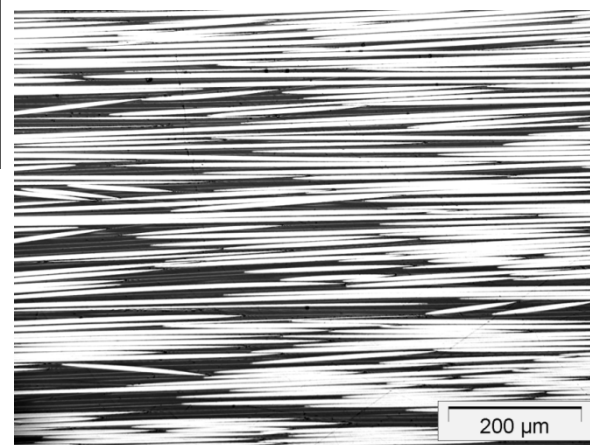
Identification du degré d'anisotropie (~ 5) et de la direction principale longitudinale

Coupe longitudinale

$$\Rightarrow \alpha_L = 1,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} \quad \alpha_T = 2,6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$



Composite carbone-résine - Cartographie 200 μm
 \times 200 μm
 Section longitudinale XY f = 14 Hz



Ajustement des iso-amplitudes
 \Rightarrow anisotropie thermique (k_x/k_y) = 5.8
 \Rightarrow identification de la direction principale \rightarrow

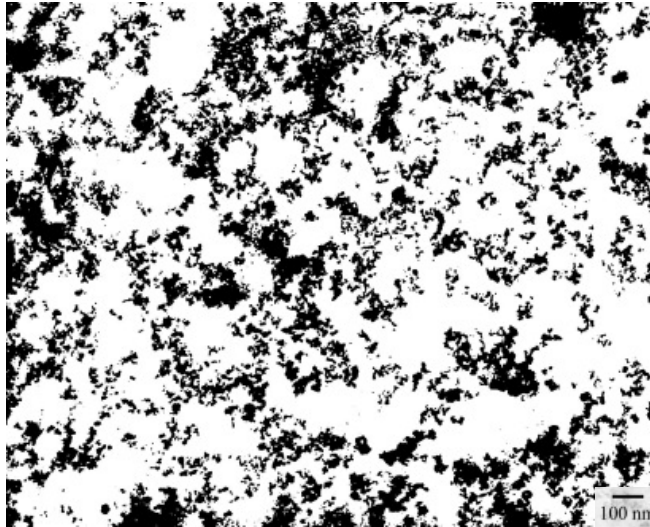
Diffusivités thermiques estimées

$$a_x = 2.84 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

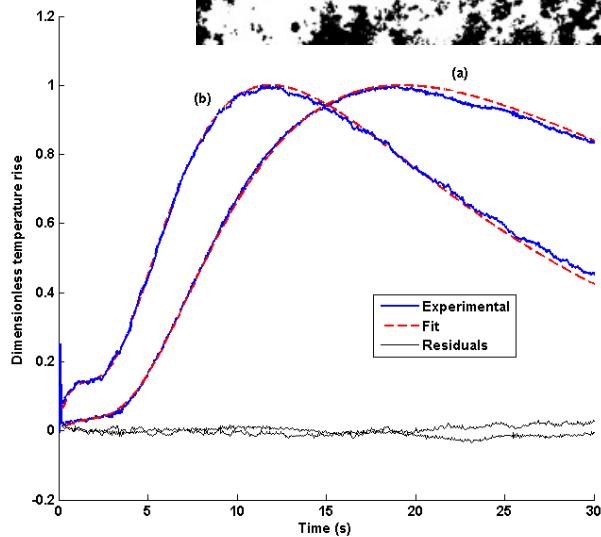
$$a_y = 4.89 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

Prise en compte dans la modélisation du transfert couplé conducto-radiatif

Superisolant nanoporeux

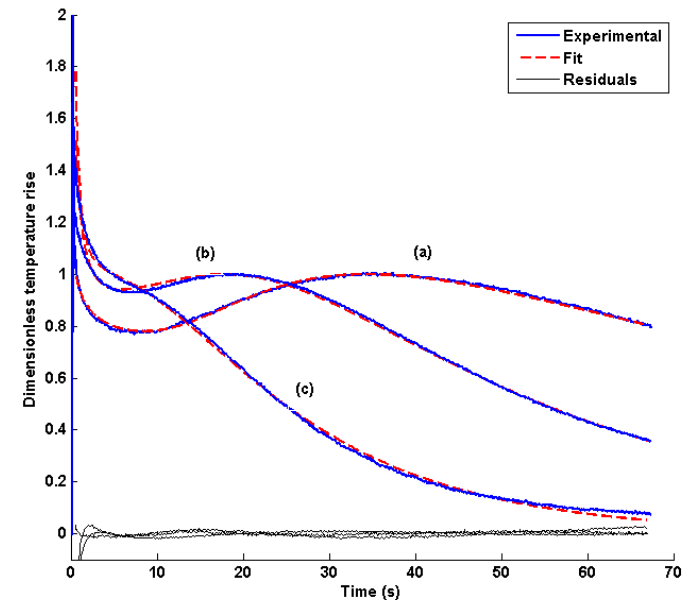


WDS



(a) 20°C; (b) 390°C

Aérogel de silice



Identification de thermogrammes expérimentaux obtenus à 20°C (a), 145°C (b) et 306°C (c) à l'aide du modèle conducto-radiatif

SOMMAIRE

Mesure des propriétés thermiques

- caractérisation de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique (méthodes photothermiques)



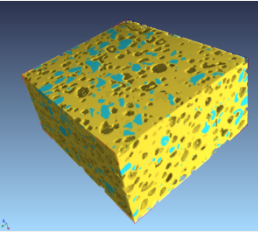
Modélisation des propriétés thermiques

- présentation de la démarche
- exemples d'applications

Démarche mise en place : chaînes d'analyse et d'expériences numériques

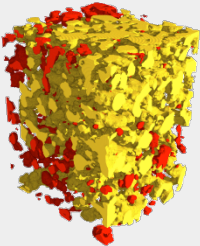


Matériaux réels



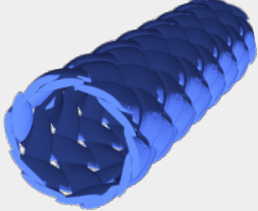
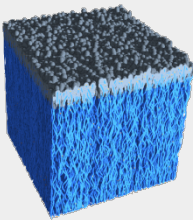
Tomographie X
(LMC, ESRF)

**Acquisition,
numérisation,
segmentation**

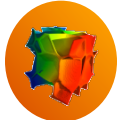


Tomographie FIB/
MEB (CERTEM)

Matériaux virtuels

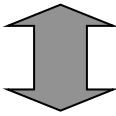


Simulation des procédés



Outils et codes « maison » (GENEMAT3D, THERMIVOX, CAST3M)

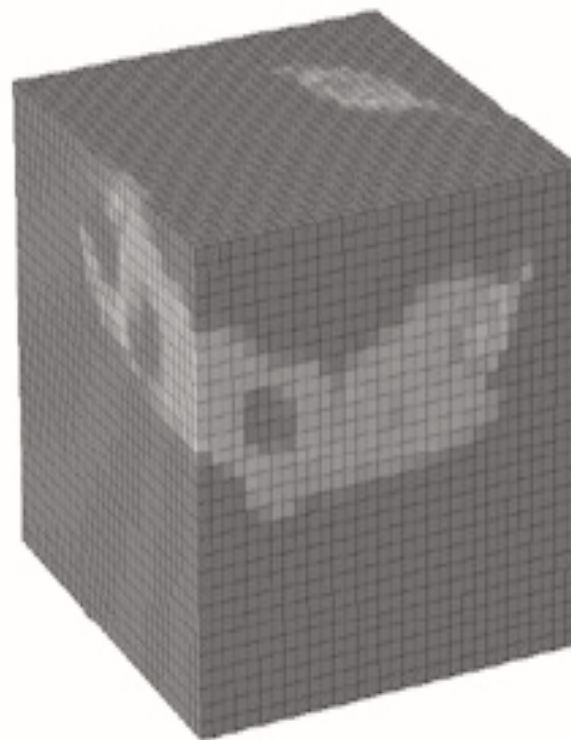
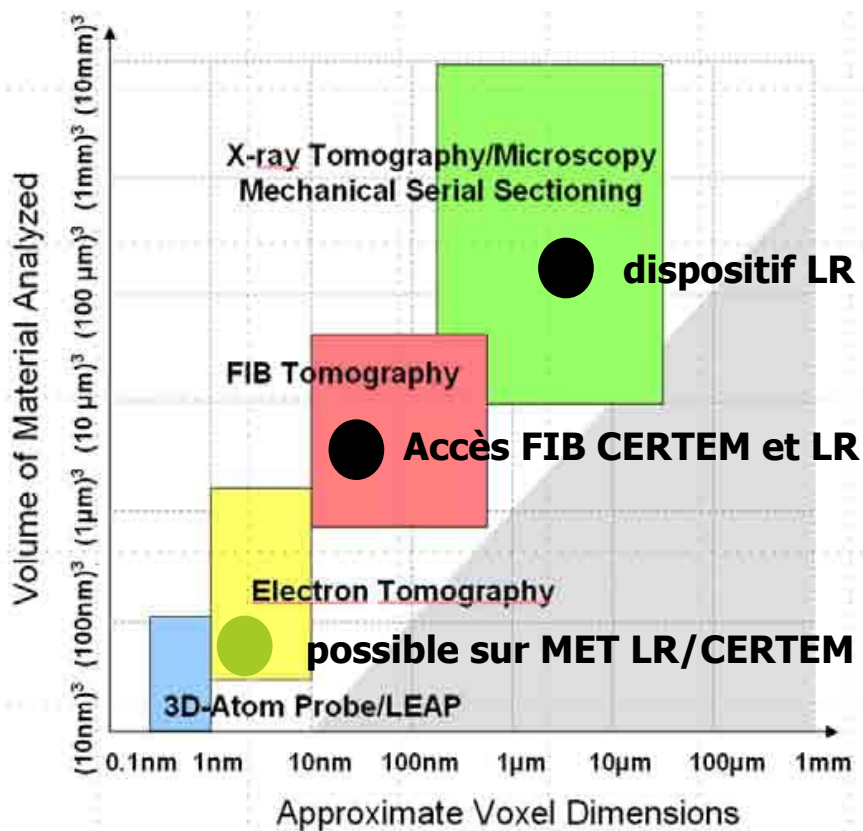
- Analyser la microstructure **de volumes représentatifs** (porosité, connectivités, distribution des phases ...)
- Déterminer des propriétés physiques par des expériences numériques (thermique, mécanique, fluide, électrique...) **alimentées par les mesures des propriétés des constituants de base**
- Réaliser des études de sensibilité: perturbations de la microstructure (topologie et/ou nature des constituants)



Procédés

Performance des matériaux
Incertitudes procédés
Conception de nouveaux matériaux

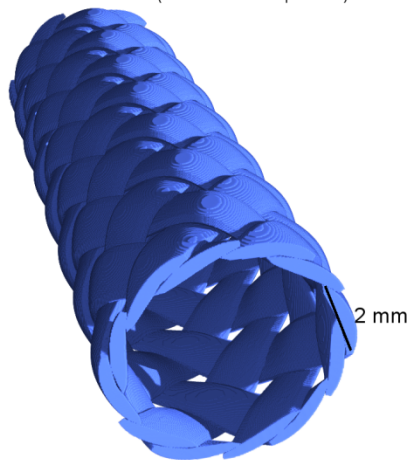
Techniques de description 3D



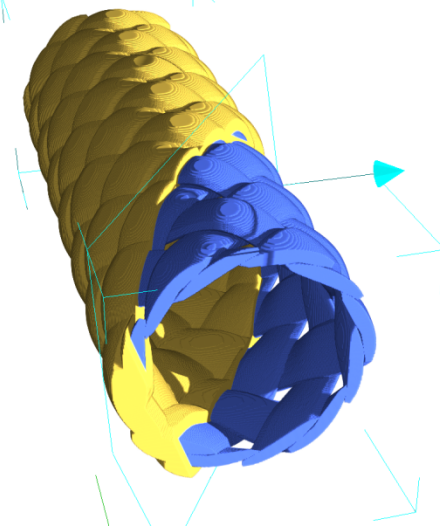
Algorithmes de construction de structure hétérogènes (GENEMAT3D)

Gaine tressée de fils de carbone

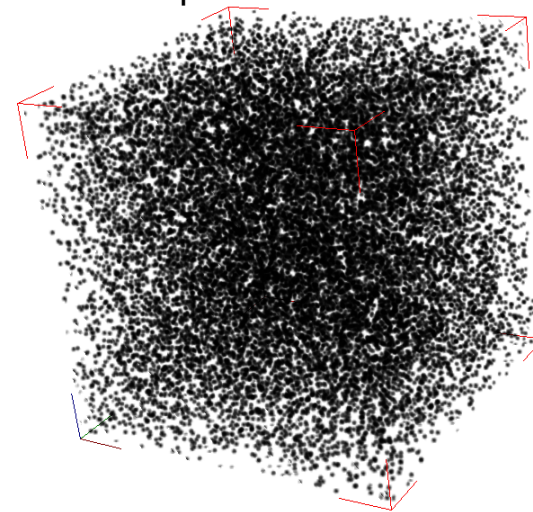
(Réalisée numériquement)



Gaine tressée densifiée numériquement



Particules dispersées dans une matrice



Création et observation du tapis de nanotubes : GREMI

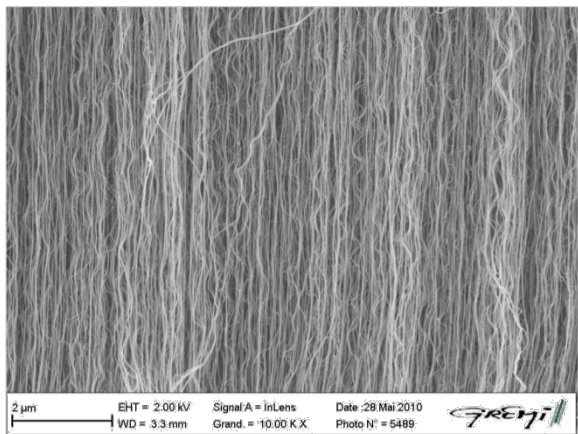
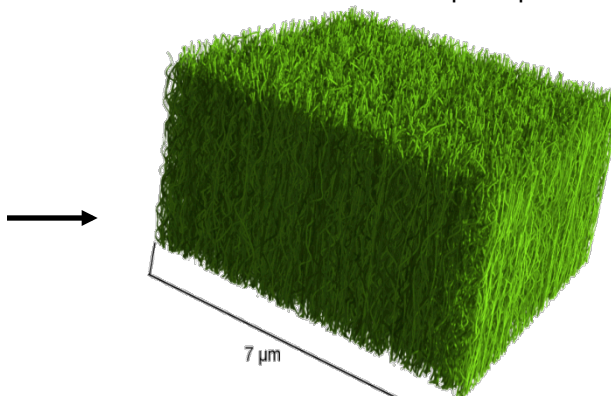


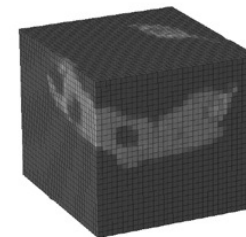
Image MEB

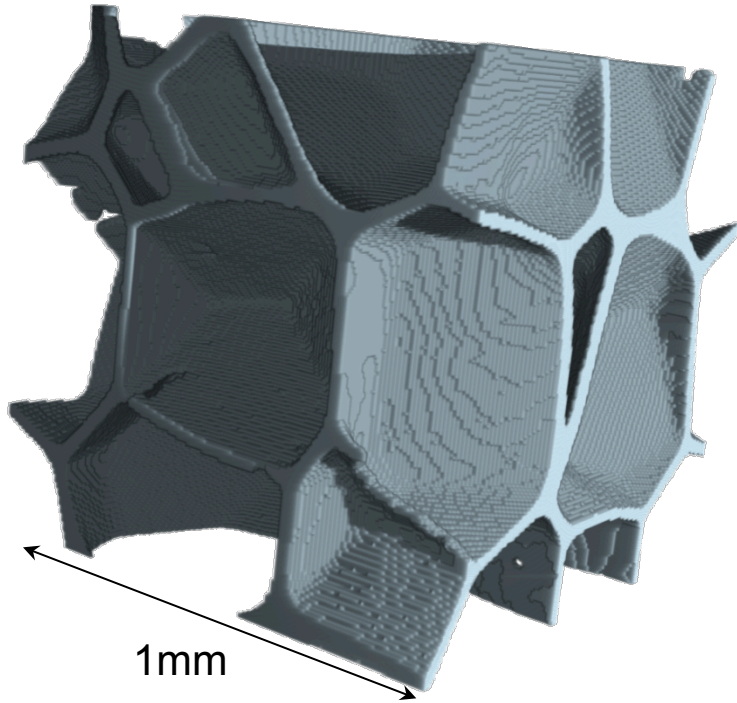
Création d'un volume numérique représentatif du tapis de nanotube : CEA



Les paramètres de création du volume dépendent des observations MEB faites sur les tapis de nanotubes.

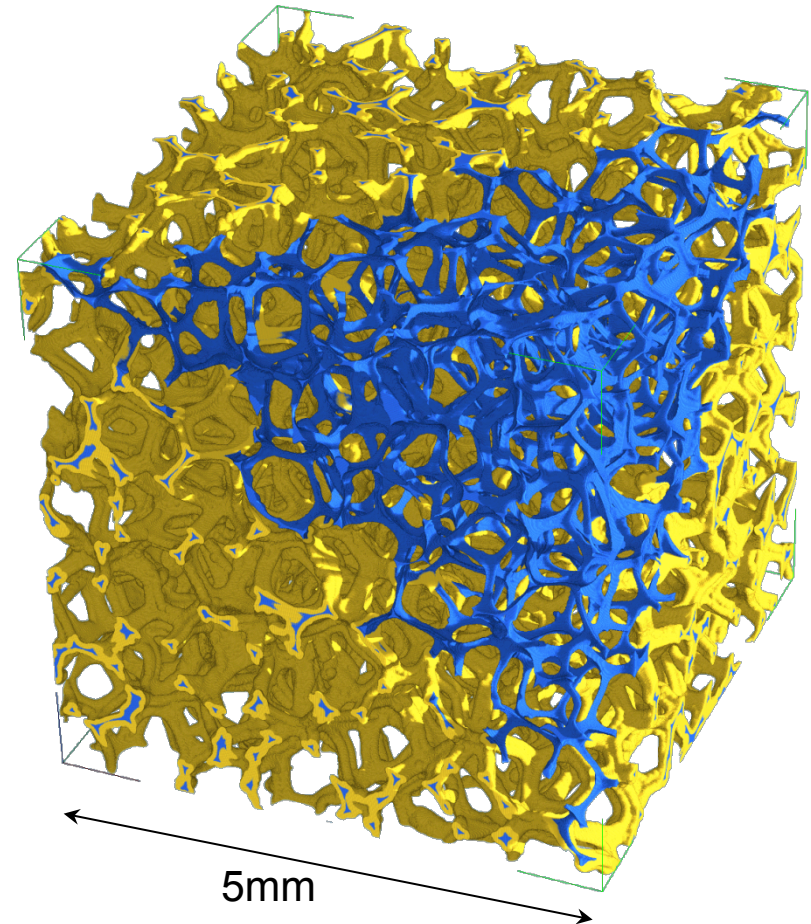
(densité, épaisseur, torsion...)



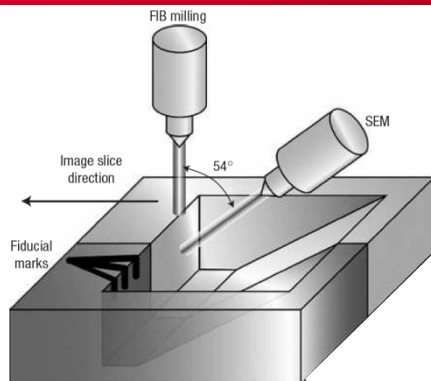


Milieu alvéolaire: mousse expansée

Mousse de carbone (bleu)
densifiée par du SiC (jaune)

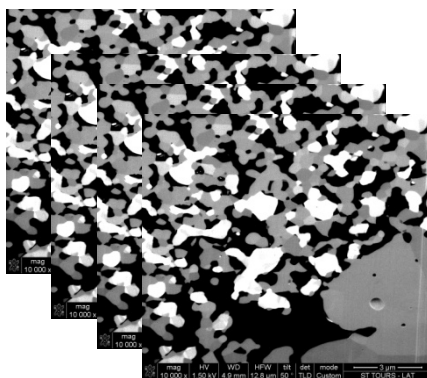


Principe de la reconstruction FIB-MEB (ou tomographie FIB)

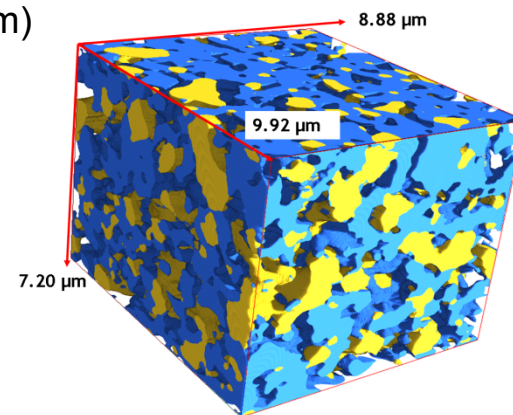


Principe du FIB/SEM (la surface d'étude de l'échantillon est parallèle au faisceau d'ions alors que le faisceau électronique est à 54 °)

Image MEB prise après chaque ablation par le FIB (Focused Ion Beam)



Reconstruction
numérique du volume



Anode d'une SOFC
Cermet Nickel (jaune) – Zircone (bleu)

Principe du traitement d'images appliqué

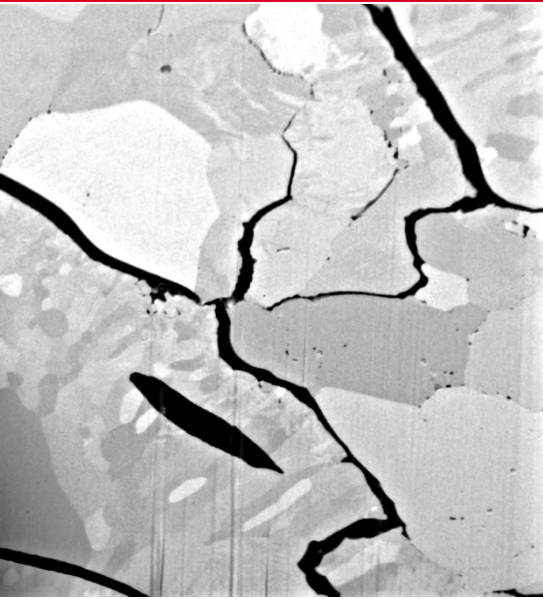


Image brute

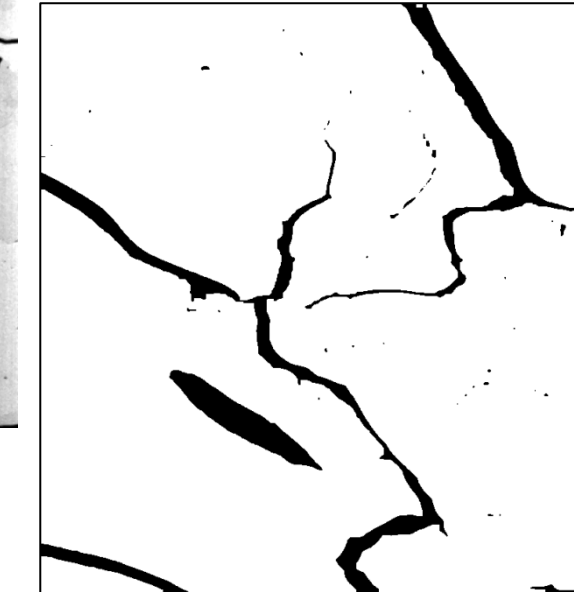
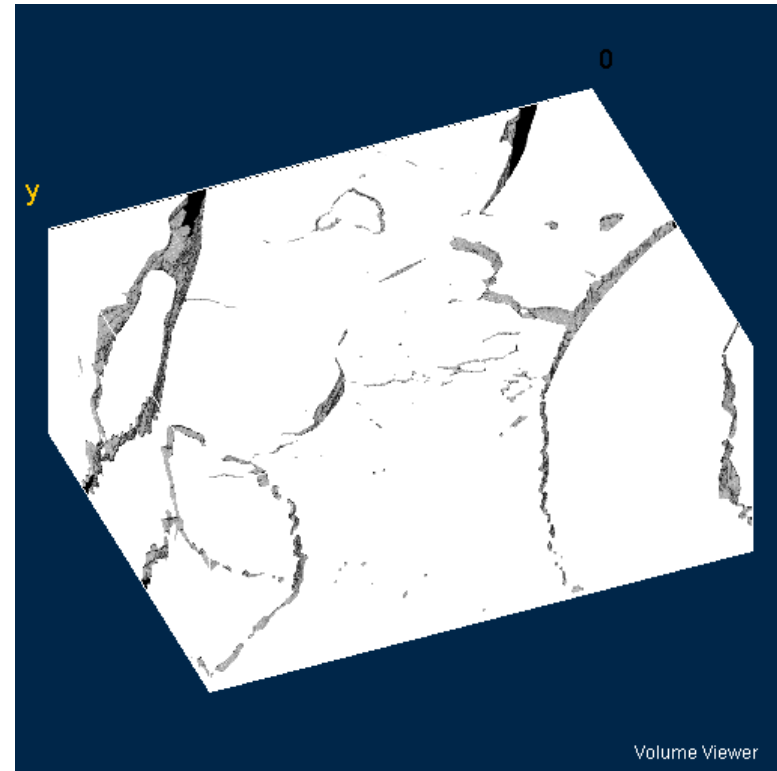


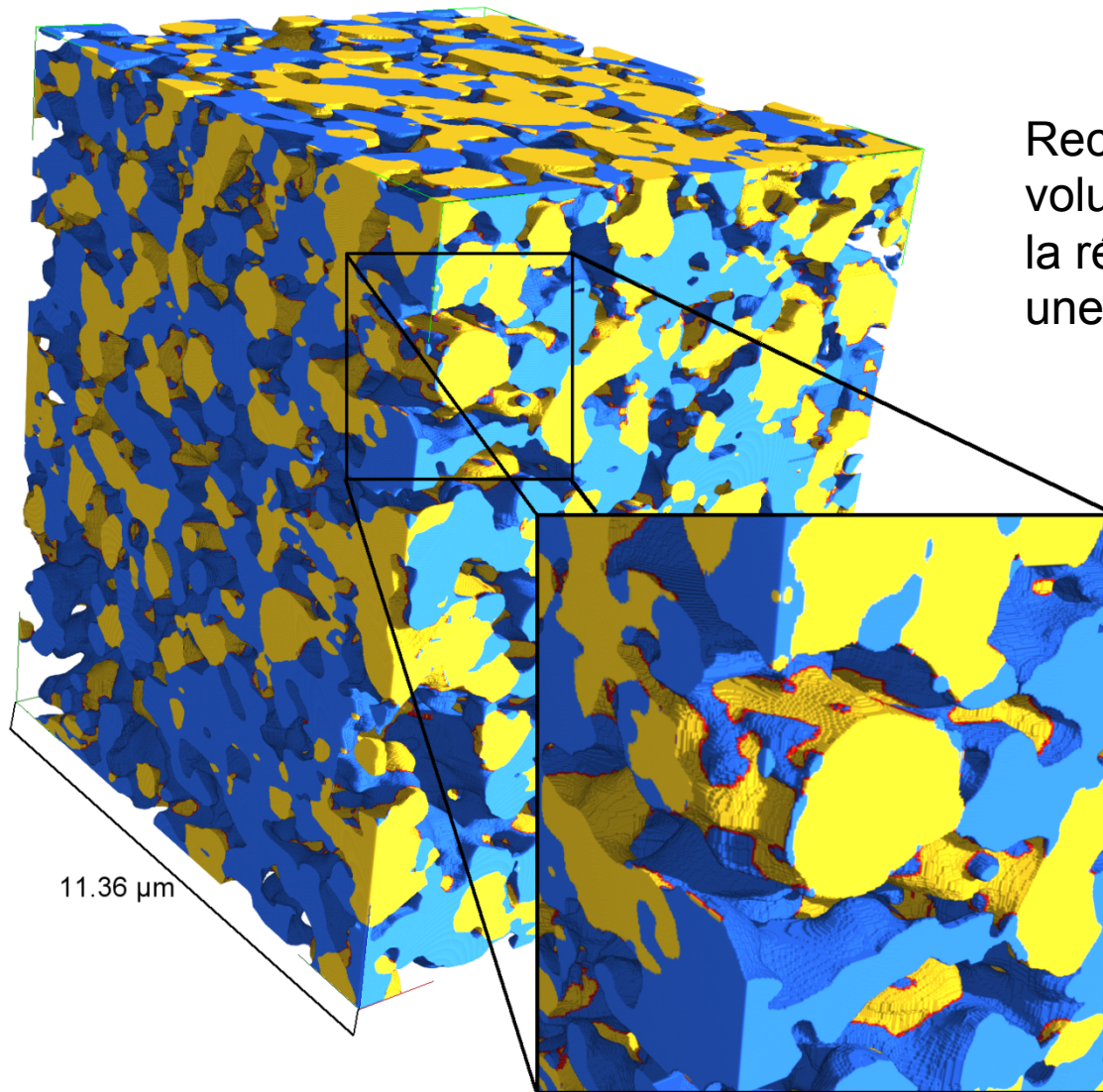
Image segmentée (seuillage, filtrage, dilatation/érosion ...) permettant la différenciation des constituants de base et leur labellisation



Volume reconstruit à partir de l'empilement d'images traitées

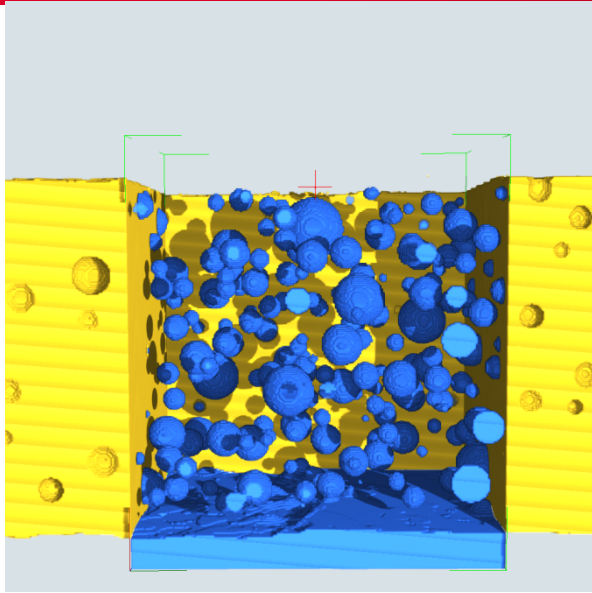


Exemple d'analyse microstructurale



Recherche des points triples des volumes de Ni connectés (lieu de la réaction électrochimique) dans une anode de pile SOFC

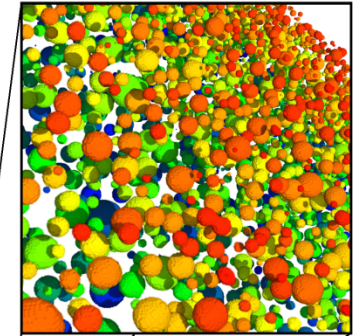
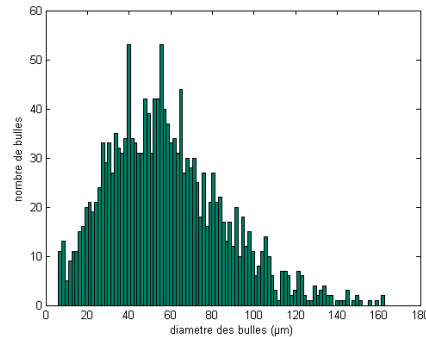
Exemples d'analyse microstructurale



Tomo X d'un échantillon d'épaisseur 1 mm

Recherche de la distribution
des tailles des bulles dans
un verre de silice

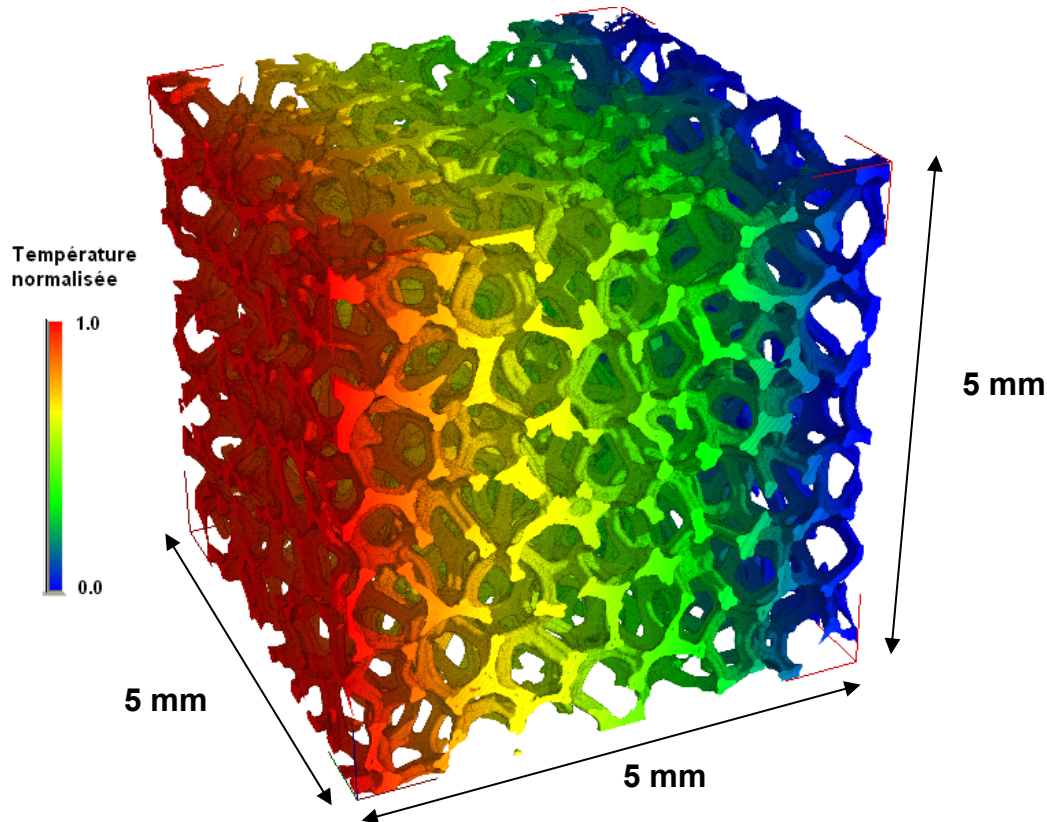
2048 Px = 10.24mm



Tomographies X d'une mousse de carbone

Détermination du tenseur de conductivité thermique par une technique de plaque chaude gardée numérique

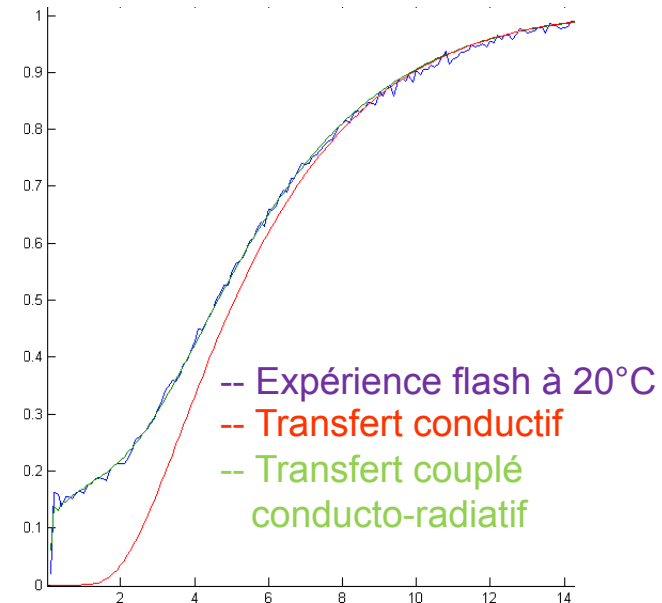
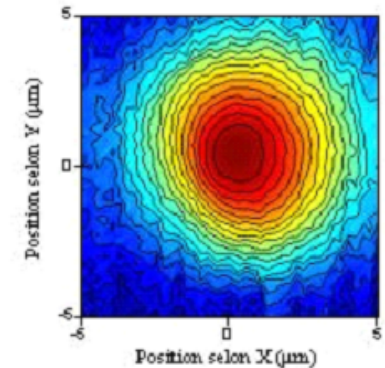
Mesure des propriétés thermiques
1- locales (squelette) par photothermie
2- effectives (matériau constitué) par flash



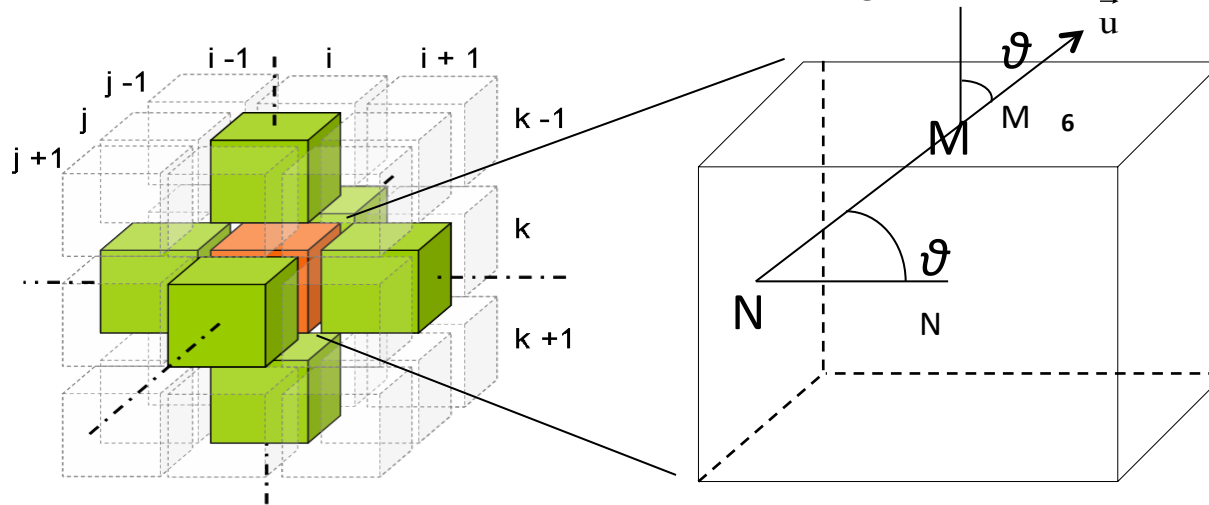
Conductivité thermique

$$\lambda_{\text{calc}} = 0,063 \pm 0,005 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{exp}} = 0,053 \pm 0,012 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$



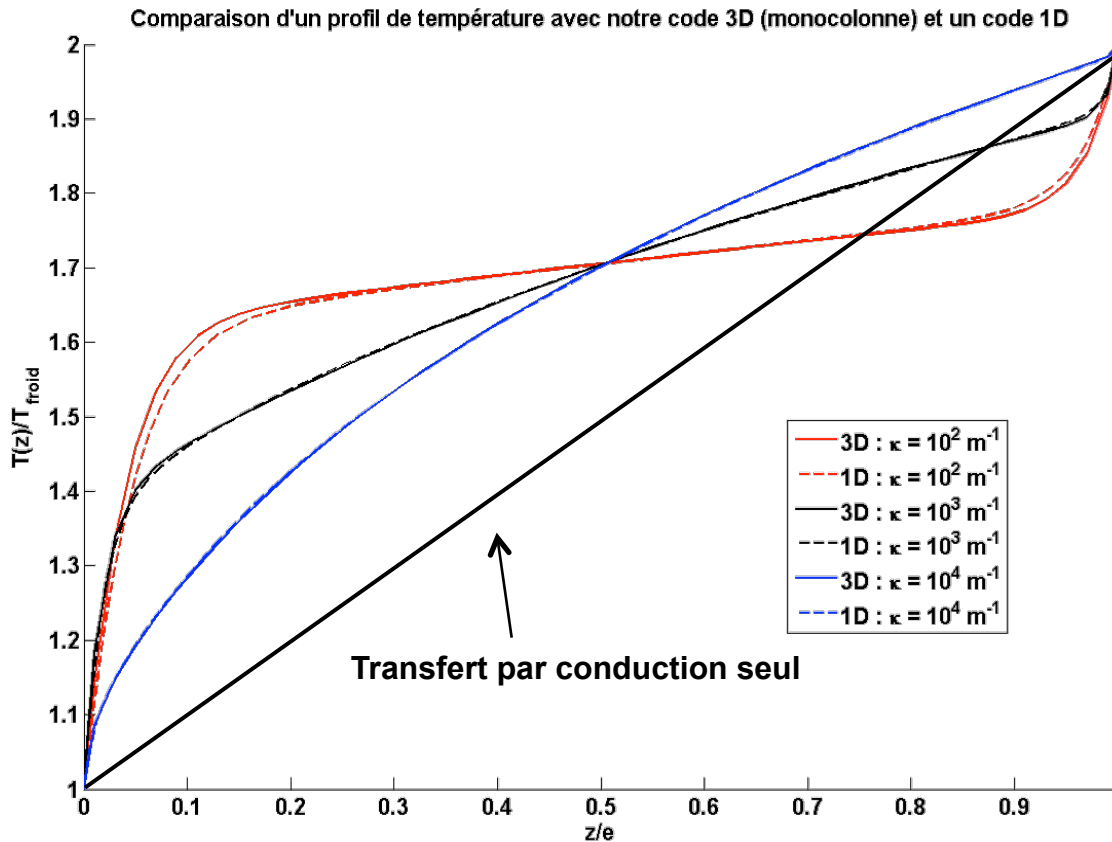
Réalisation d'un modèle 3D de simulation d'expériences thermiques à partir d'une microstructure voxelisée (prise en compte du couplage conducto-radiatif)



Principe: déterminer la température d'un voxel (supposé homogène à température uniforme) à partir des grandeurs associées aux voxels voisins (T et luminances), puis d'étendre cette résolution à l'ensemble des voxels

Hypothèses:

- voxels homogènes (pas de diffusion => ETR simplifiée et diffusion restituée par l'hétérogénéité de la structure)
- du milieu gris (grandeurs moyennées en longueur d'onde)
- de luminances isotropes par demi-espace



Comparaison inter-codes d'une expérience de plaque chaude gardée

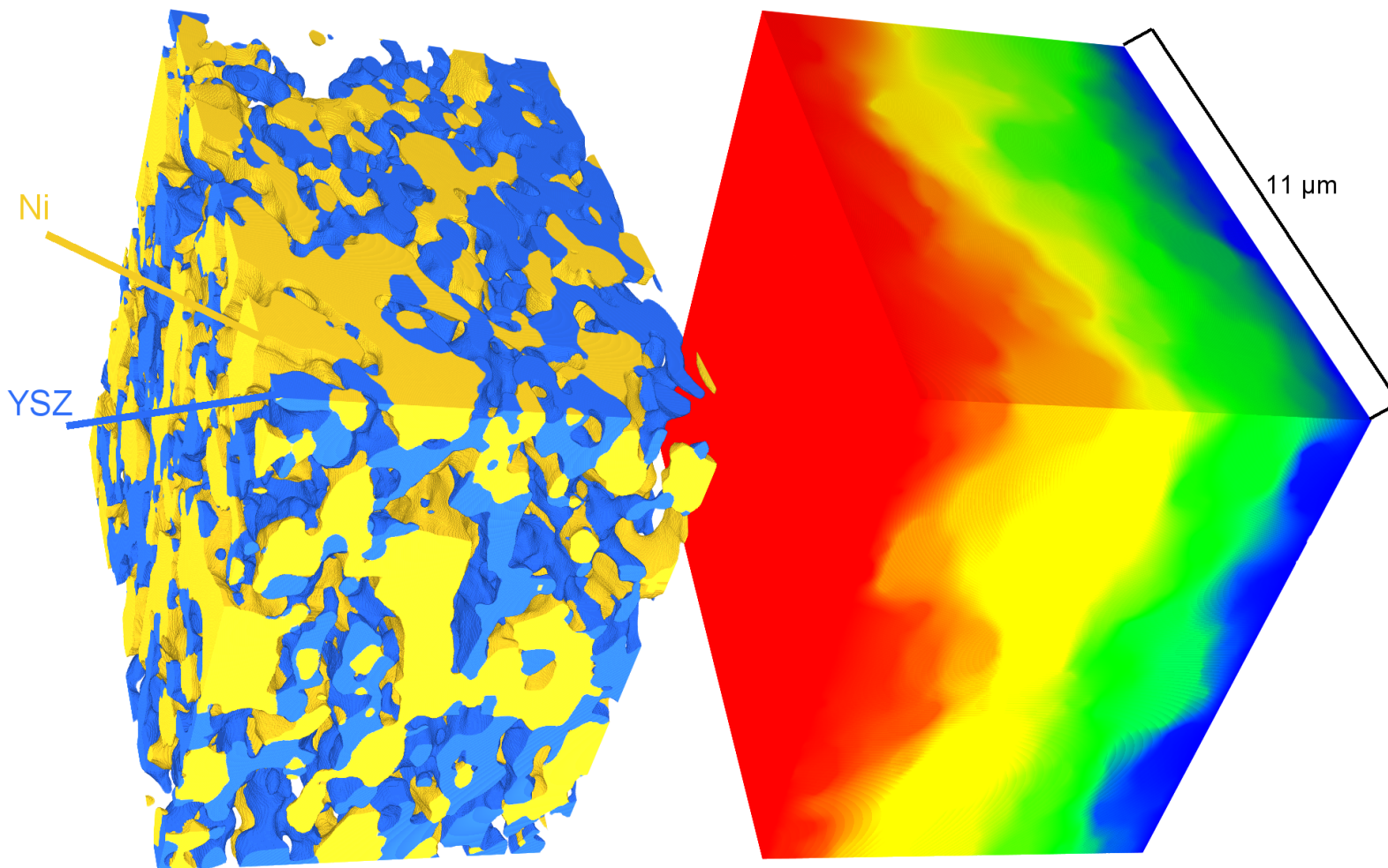
code 1D couplé conducto-radiatif (Méthode OD)

Cas d'un milieu semi-transparent homogène inséré entre deux plaques infinies d'émissivités données

Prochaine étape: simulation de thermogrammes obtenus à 1000°C sur un milieu semi-transparent poreux (verre à bulles) sur super-calculateur

Démarche de modélisation applicable dans d'autres domaines physiques

Rappel: besoin de volumes représentatifs et des propriétés des constituants de base à l'échelle du voxel



3D reconstructed SOFC anode

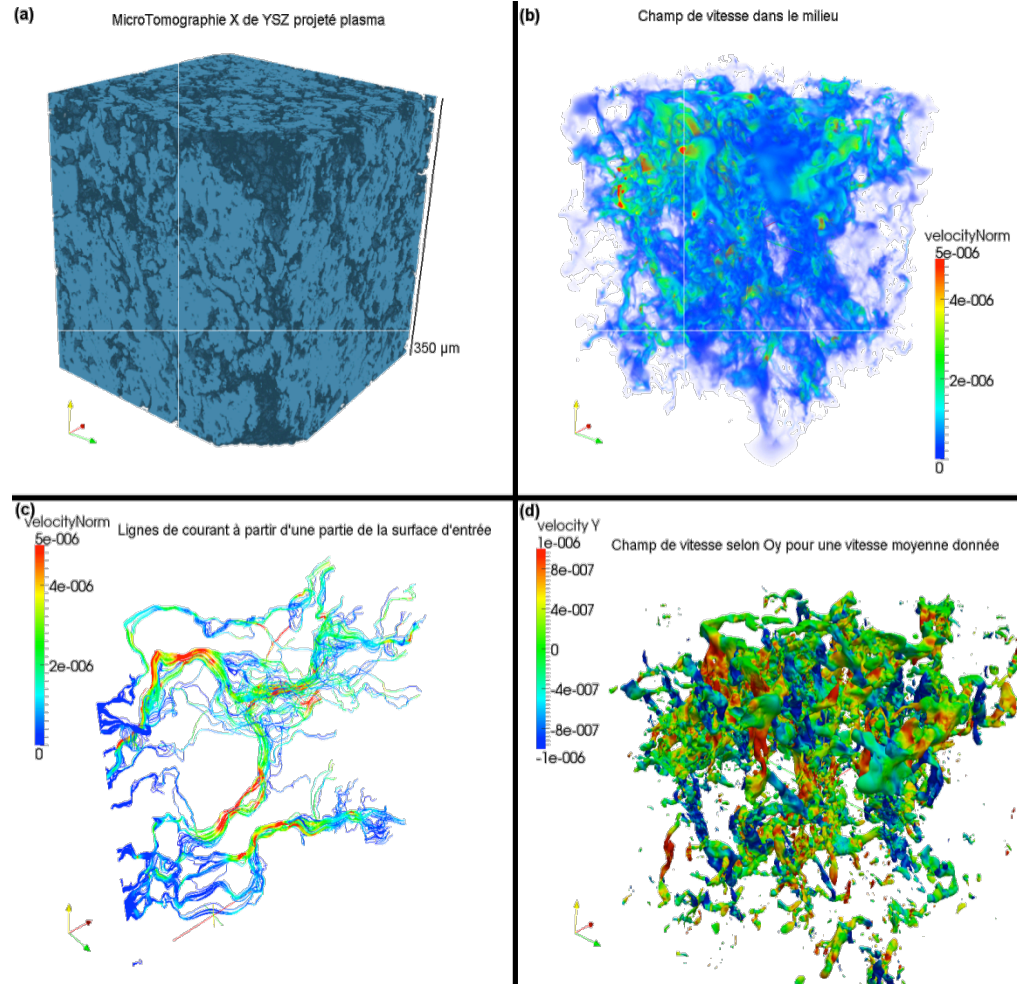
Electric field in the porous media

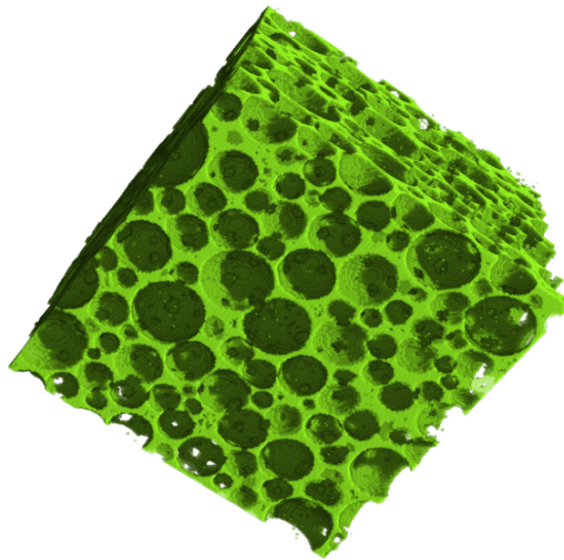
Expérience numérique de perméation :

- microstructure réelle obtenue par tomographie-X,
- résolution de $0,678 \mu\text{m/Vx}$
- Simulation d'écoulement fluide dans un milieu poreux
- Différence de pression imposée

Porosité de 30% :

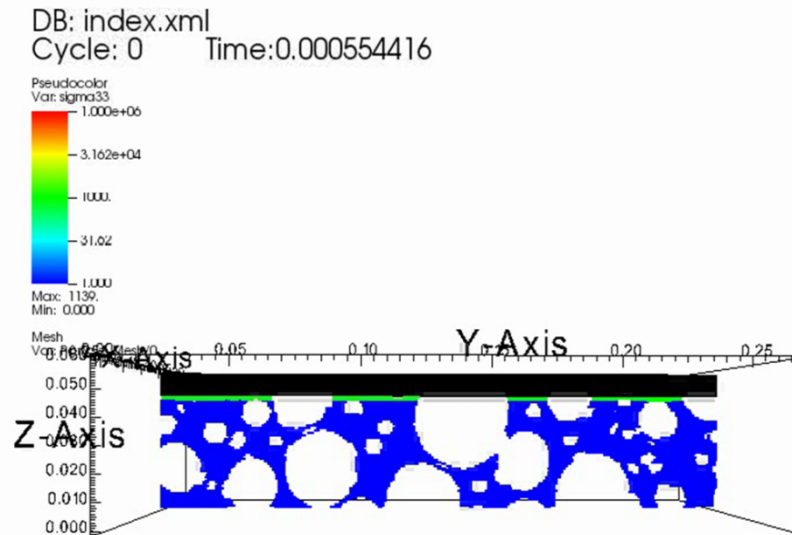
→ perméabilité de $5,42 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$





Vue en coupe d'un volume de 260x260x50 voxels
⇒ Comportement attendu du milieu vis-à-vis du piston

NB: VER estimé à 500^3 voxels \Rightarrow ~ 48 h sur 1000 proc.



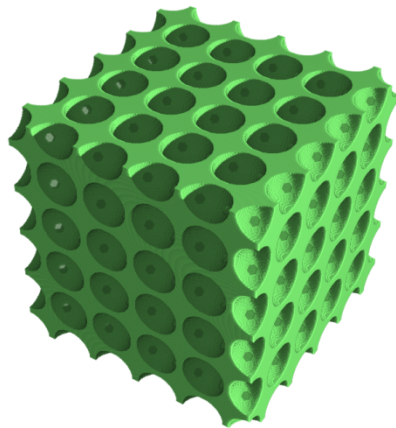
Structure à pores fermés: mousse Polyuréthane



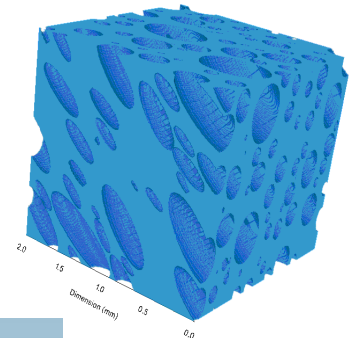
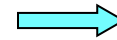
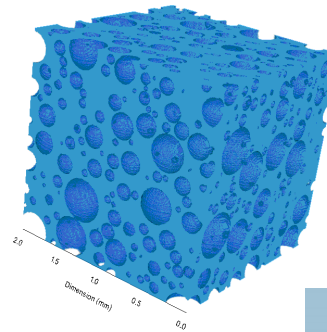
Conception de matériaux numériques 3D

Connaissances des liens microstructures / propriétés effectives (thermiques, mécaniques)

✓ génération de matériaux virtuels
(périodiques ou aléatoires)

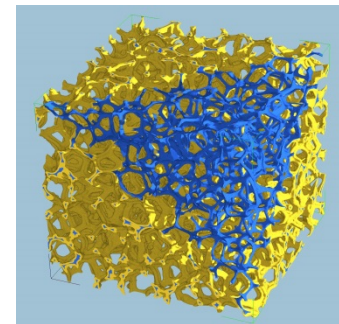


✓ acquisition de microstructures réelles
. déformations géométrie (ρ ct)

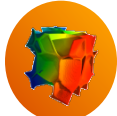
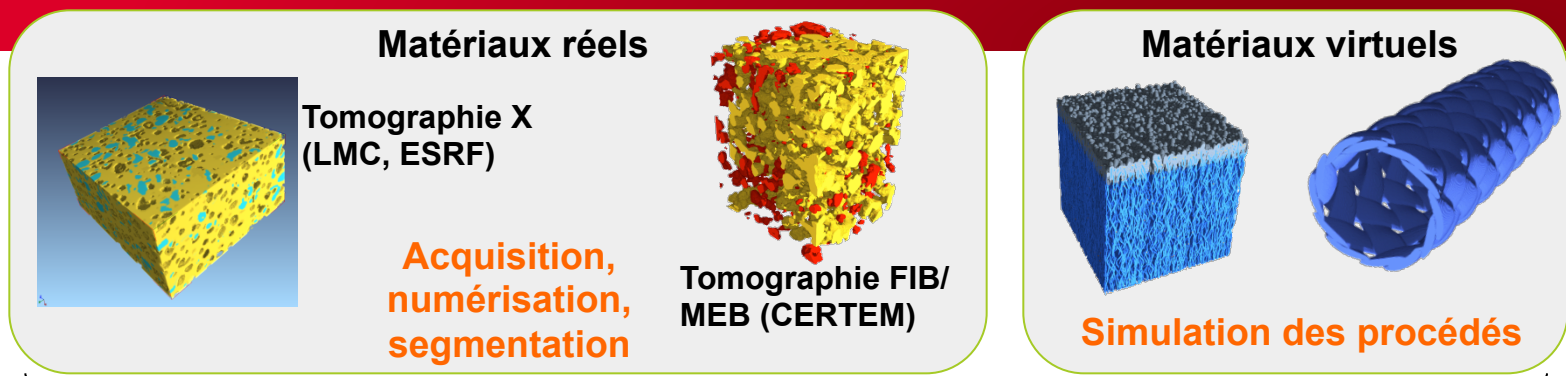


. modification de ρ
(taille des ligaments)

. Changement de nature
des constituants



Démarche mise en place : chaînes d'analyse et d'expériences numériques



Outils et codes « maison » (GENEMAT3D, THERMIVOX, CAST3M)

- Analyser la microstructure **de volumes représentatifs** (porosité, connectivités, distribution des phases ...)
- Déterminer des propriétés physiques par des expériences numériques (thermique, mécanique, fluide, électrique...) **alimentées par les mesures des propriétés des constituants de base**
- Réaliser des études de sensibilité: perturbations de la microstructure (topologie et/ou nature des constituants)

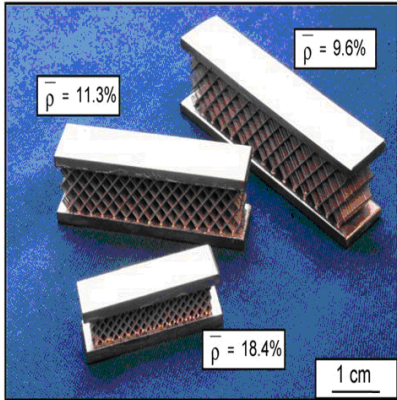


Procédés

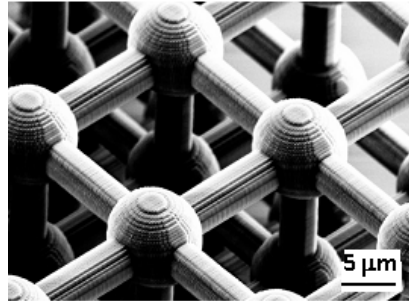
Performance des matériaux
Incertitudes procédés
Conception de nouveaux matériaux



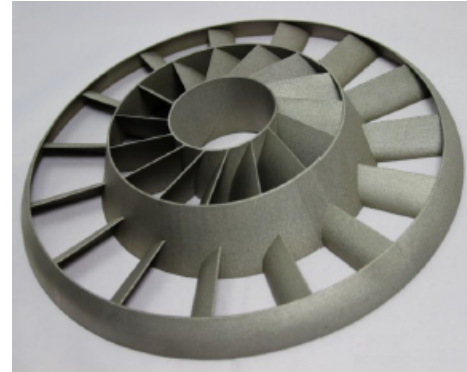
Illustration du potentiel de la F.A



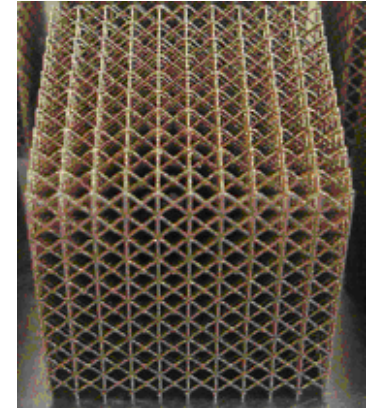
Nida SiC/TA6V



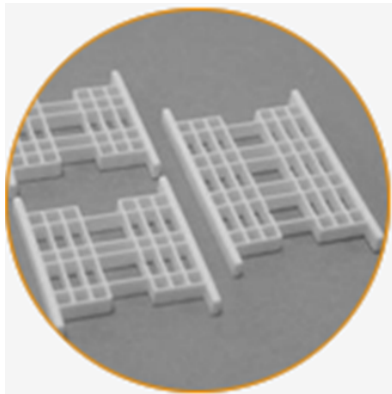
Treillis résine



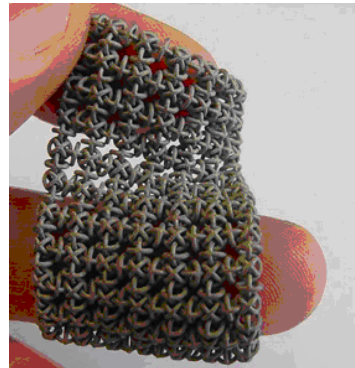
Pièce de turbine



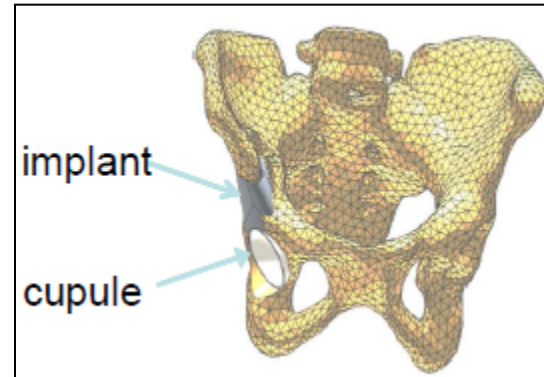
Treillis Al, Ti, acier



Filtres micro-ondes
ZrO₂



Mailles métalliques
articulées



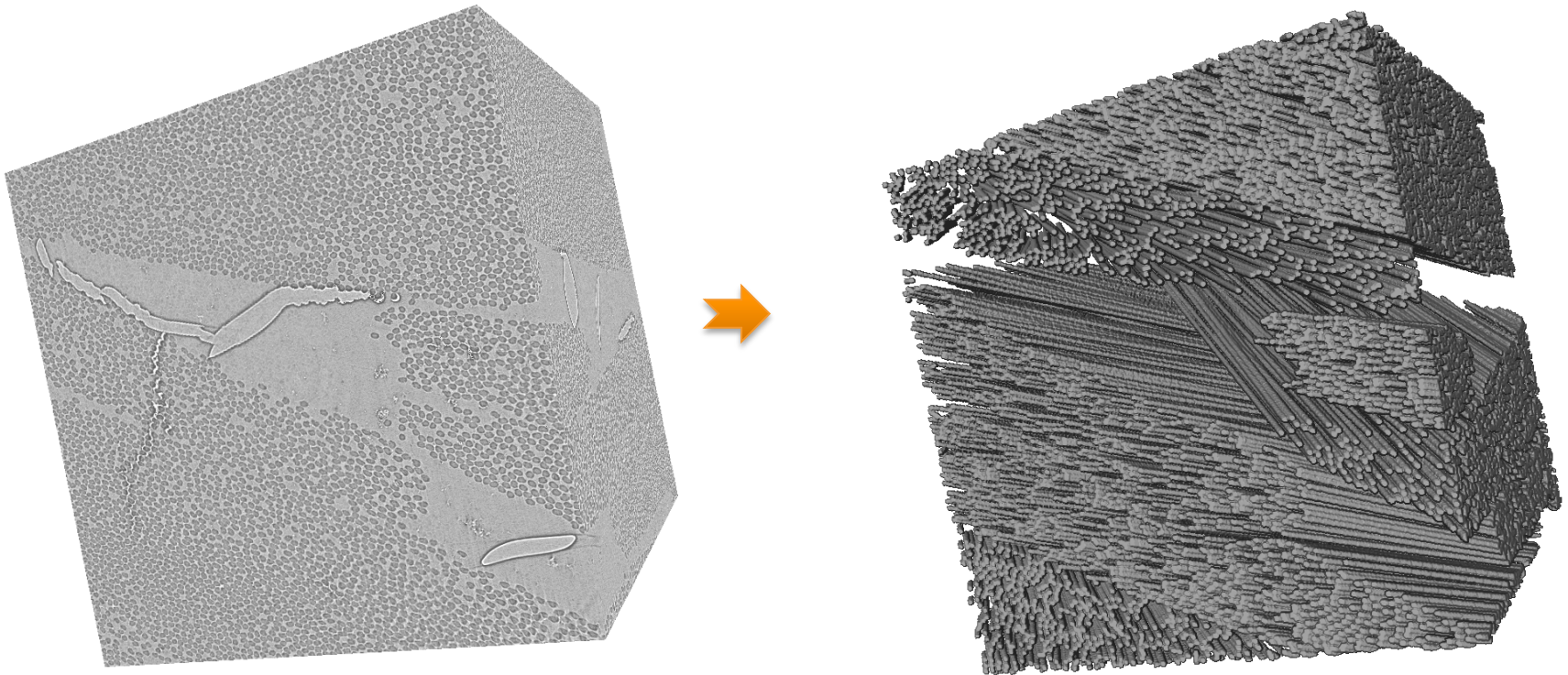
Fabrication d'implants pour
reconstruction osseuse

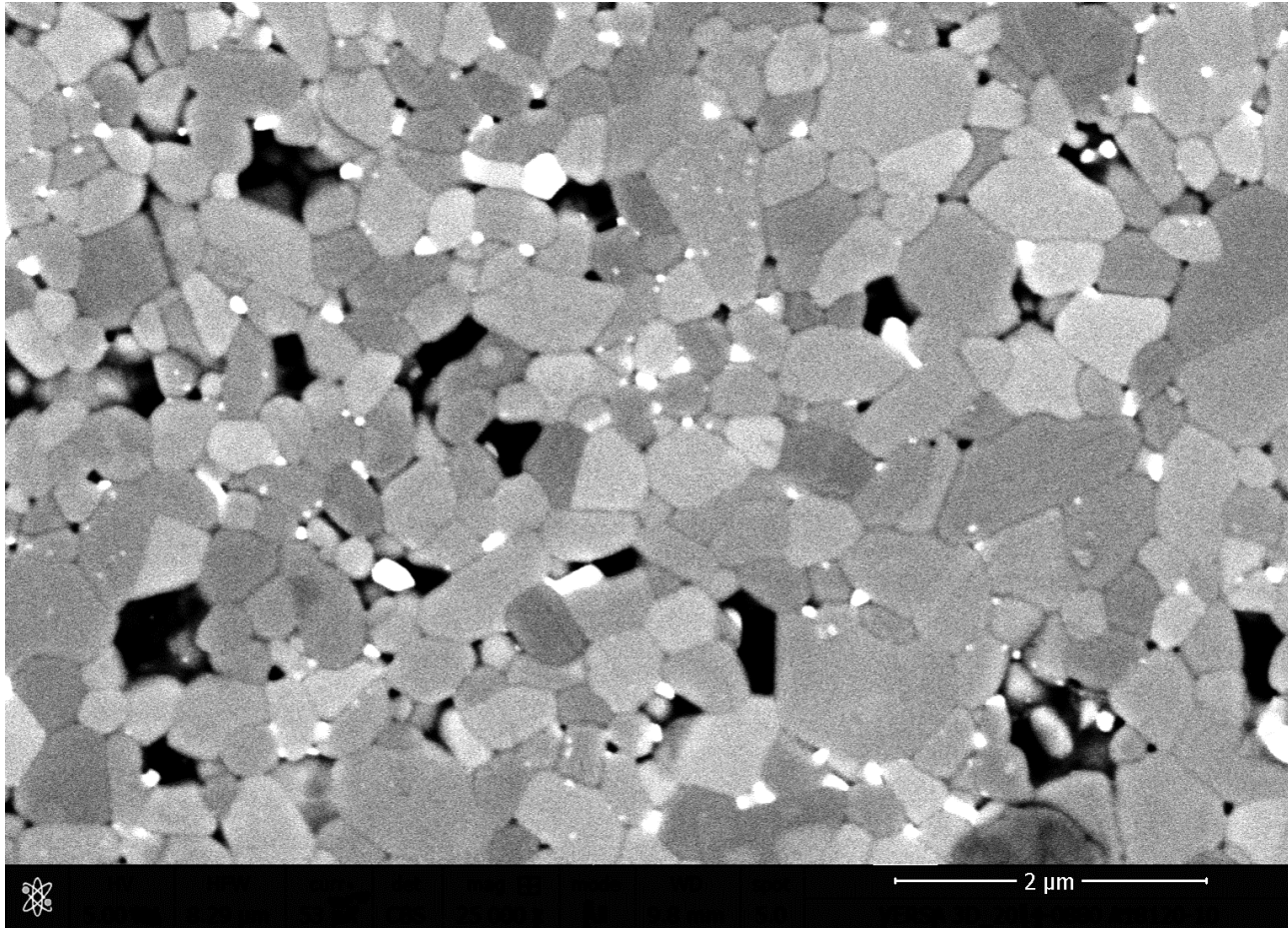


Impression
biologique in vivo

Collaboration avec le MAPMO à Orléans: thèse Amaury Walbron

Objectif : **Analyse 3D de matériaux hétérogènes pour la détection des orientations des constituants**



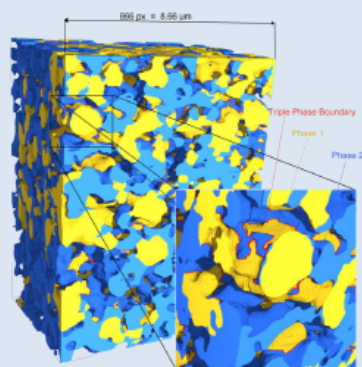


Besoin: détermination des fractions volumiques des 3 espèces (noire (air), blanche et grise) et recherche de la distribution des tailles de grain de la phase grise

Premières JOURNÉES MATÉRIAUX NUMÉRIQUES

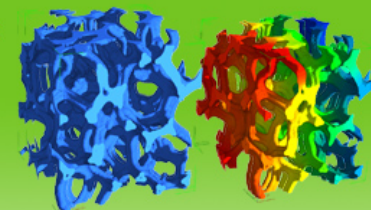
De la numérisation au comportement

Loches. 12.13-14 février 2013



Deuxièmes Journées Matériaux Numériques

de la numérisation...
... au comportement



JMN 2015 - St-Aignan-sur-Cher (Loir-et-Cher), 3 au 5 février 2015

Accueil | Bienvenue sur le site des Journées Matériaux Numériques 2015

Mercredi 9 juillet 2014

Deuxièmes Journées Matériaux Numériques :

Suite au succès des premières journées matériaux numériques début 2013, le Comité Scientifique a le plaisir d'annoncer la tenue des **"Deuxièmes Journées Matériaux Numériques"** du 3 au 5 février 2015.

Ces journées se dérouleront dans un site d'exception, le **Zoo de Beauval** (St-Aignan-sur-Cher, 41). Ce site nous offre toutes les commodités requises (hébergement, salle de conférence, restauration) sur un seul et même lieu. Pour ceux qui ne le connaissent pas encore, ce sera l'occasion de découvrir l'un des plus beaux zoos au monde.

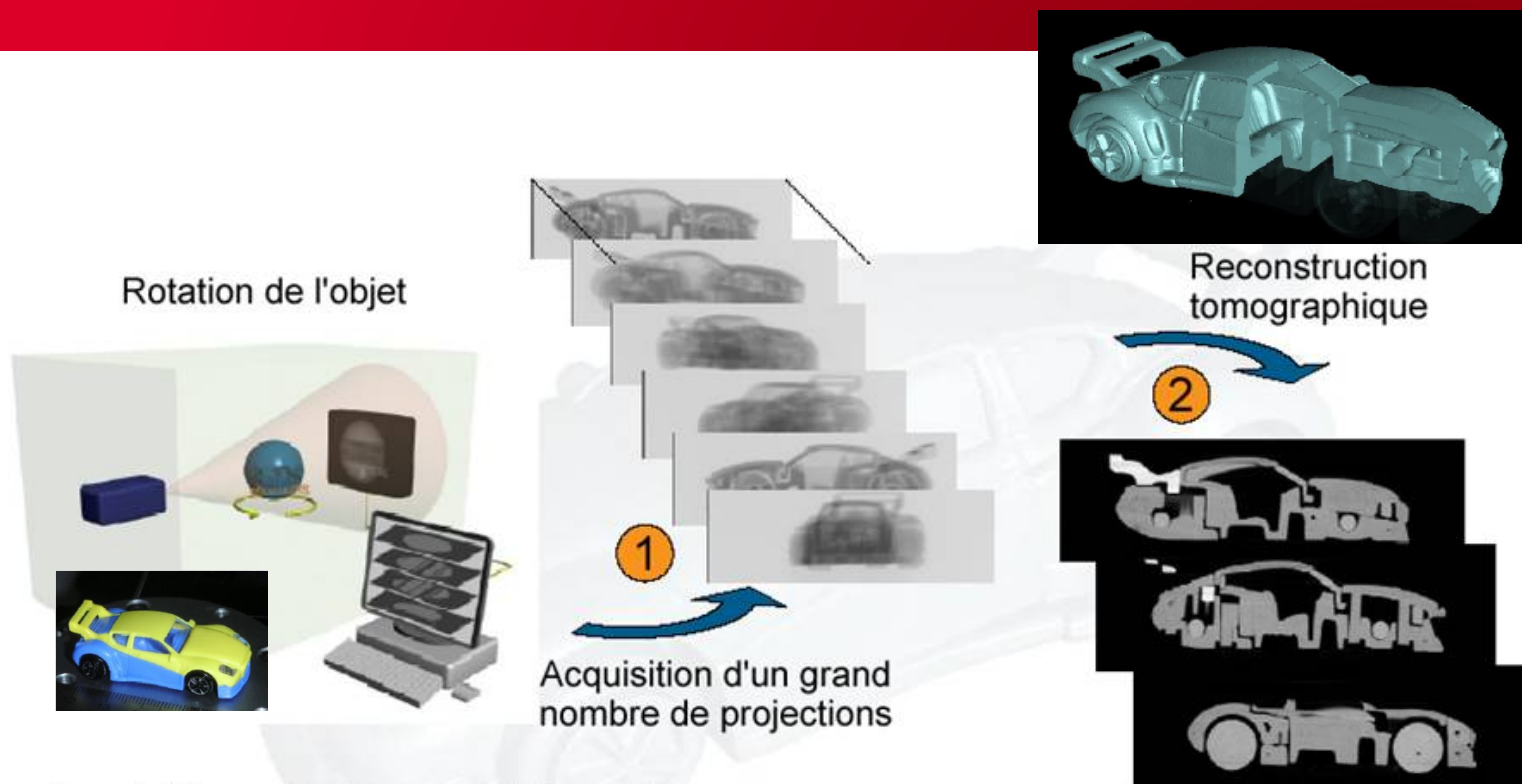
La science ne sera pas en reste avec une thématique principale dans la continuité de l'édition précédente. Il s'agira de traiter des **différents développements en science des matériaux faisant appel aux matériaux numériques**. Ce terme regroupe plusieurs disciplines qui vont de l'expérimental (numérisation) à la modélisation en passant par les mathématiques appliquées (segmentation). On peut citer entre autres :

- Mesures locales de propriétés
- Techniques de numérisation (microscopies, tomographie X...)
- Génération de matériaux virtuels
- Mathématiques appliquées (segmentation, analyse morphologique)
- Modélisation du comportement de matériaux numériques.

Cette deuxième édition sera l'occasion de mettre l'accent sur un thème choisi prochainement par le comité scientifique.

Sélectionner une langue Fourni par GoogleTraduction

Merci de votre attention



- Acquisition : plusieurs centaines de radios autour de la pièce (en réalité : le plus souvent, c'est la pièce qui tourne, contrairement au scanner médical)

- Puis : reconstruction tomographique de la pièce en 3D (calcul informatique), sous la forme d'un grand nombre de coupes au travers de l'image

