



LABORATOIRE DE THERMOCINÉTIQUE DE NANTES
UMR 6607

Caractérisation des propriétés radiatives de mousses à structure numériquement contrôlée : vers le design d'absorbeurs solaires

Encadrant : B.Rousseau (LTN), Co-encadrants
G.Domingues (LTN), J.Vicente (IUSTI)

*Simon Guévelou
6 Septembre 2012*

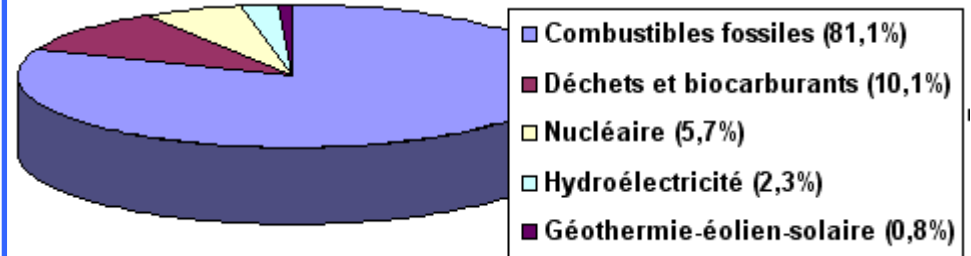


Introduction - contexte



Absorbeur d'énergie
solaire
(Abengoa Solar – Séville)

L'énergie solaire concentrée est un défi d'avenir
pour la production d'énergie



- Nécessité d'améliorer le rendement de ce type de production
 - Développement d'absorbeurs solaires volumétriques efficaces (projet OPTISOL)
- Pertinence des **mousses de SiC à pores ouverts**

Maitriser les caractéristiques thermo-radiatives des mousses de SiC afin d'en améliorer l'efficacité





Problématique - objectifs

Optimisation : Etablir des liens entre les caractéristiques texturales d'une mousse de type SiC avec ses propriétés thermo-radiatives



Problématique :
-générer plusieurs mousses avec des propriétés texturales contrôlées est une tâche fastidieuse
-procédés influant sur la morphologie de la mousse



Utilité d'un outil de génération de mousses virtuelles doté de moyens de caractérisation associés





Sommaire

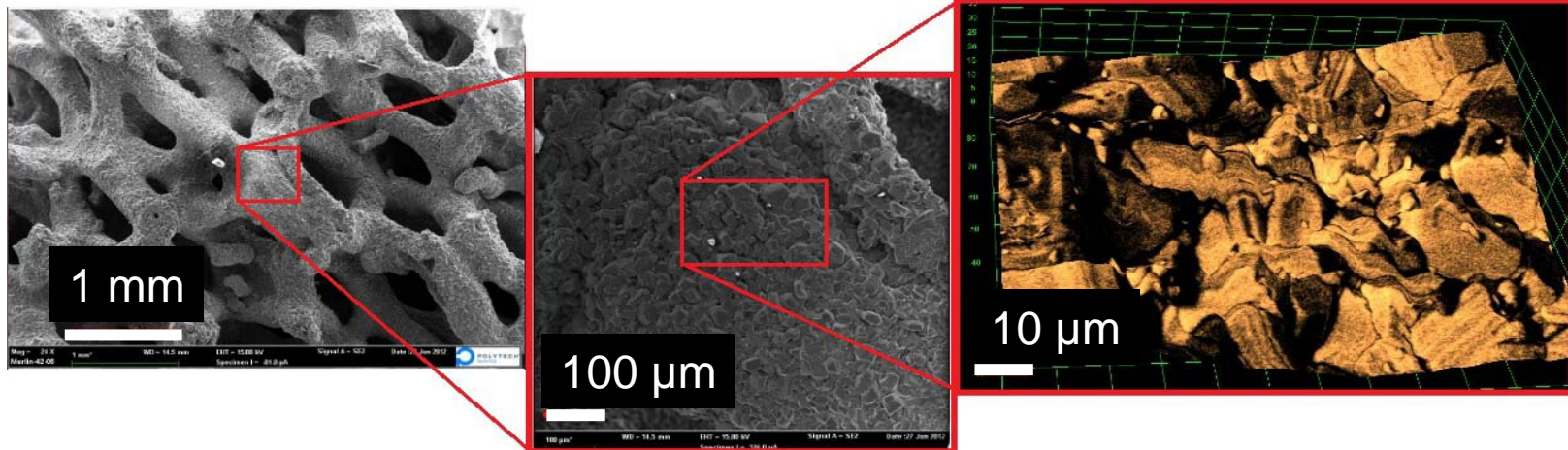
- **Présentation de la mousse de SiC utilisée, objectifs**
- **Génération aléatoire de matériaux cellulaires**
 - Méthode de génération
 - Fast-Marching
 - Squelettisation
 - Reconstruction 3D
- **Comparaison sur le plan des propriétés thermo-radiatives**
- **Conclusions**
- **Perspectives**





Présentation de la mousse de SiC utilisée

Mousse céramique chinoise B-12 de SiC (α) fournie par le PROMES (Odeillo):



Images MEB-FEG réalisées à l'IMN (Nantes, Yann Borjon-Piron)

- Mousse à pores ouverts
- Porosité de 70%
- Rugosité de surface
- Bonne tenue à l'oxydation à hautes températures
- Permet d'atteindre des températures de l'ordre de 1600°C





Objectifs

Générer une mousse :

- De porosité 70%,
- Présentant une texture réaliste,
- Présentant des brins ressemblants,
- Présentant une distribution de taille de cellules et de brins,
- Possédant des cellules légèrement ovales.





Génération aléatoire de mousses

Méthode de génération

- 1) **Ensemencement aléatoire de centres dans une matrice 3D de voxels**
- 2) **Fast-Marching : génération d'une carte de distance**
*Thèse Emmanuel Brun (IUSTI 2009),
Thèse Ender Konukoglu (Sophia Antipolis 2009)*
- 3) **Obtention des cellules par ligne de partage des eaux**
Thèse Emmanuel Brun
- 4) **Squelettisation et croissance**
- 5) **Reconstruction 3D (Marching-Cube)**
programme iMorph, J. Vicente (IUSTI)
<http://imorph.sourceforge.net/>





Génération aléatoire de mousses

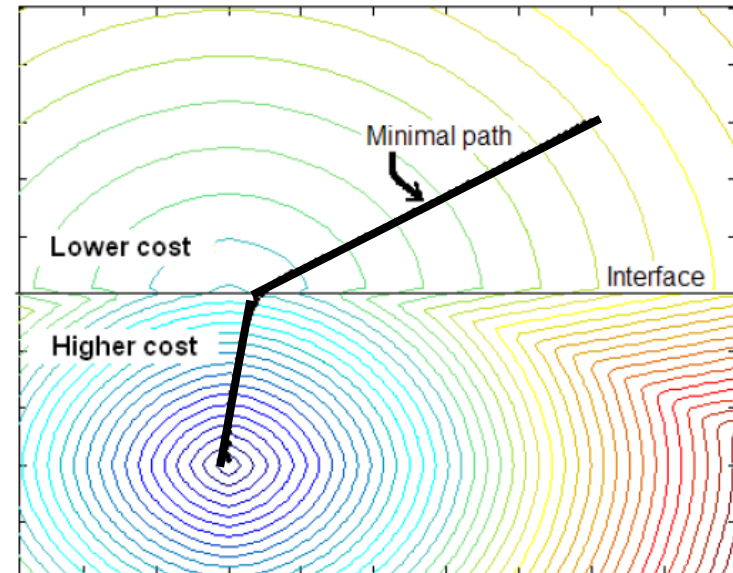
Algorithme de Fast-Marching

Résolution d'une équation de propagation de la lumière non linéaire et aux dérivées partielles : l'Equation Eikonale

Applications du Fast-Marching

- Recherche de chemin optimum
- Modélisation de progression de tumeurs

$$||\nabla T(x)||F(x) = 1$$



Génération d'une carte de distance en 3D :
On calcule la distance de chaque voxel par rapport au centre de l'ensemencement le plus proche



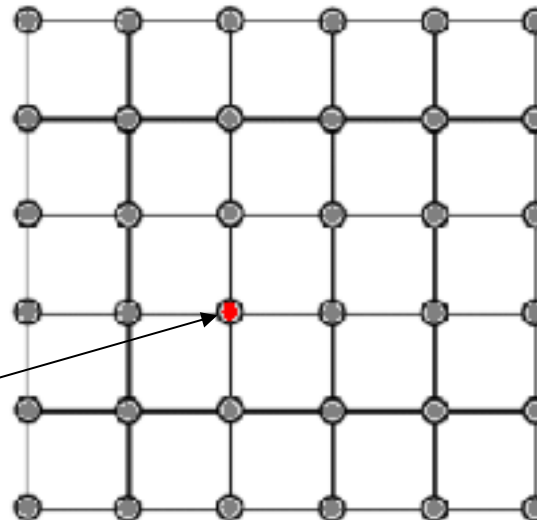
Génération aléatoire de mousses

Algorithme de Fast-Marching

Principe de propagation du front :

initialisation

Centre de
l'ensemencement



KNOWN
FAR

KNOWN : points dont la distance au centre est connue et ne sera pas recalculée (à l'initialisation ils correspondent aux centres de l'ensemencement, distance = 0)

FAR : points dont la distance au centre est encore inconnue (à l'initialisation : distance = infinie)



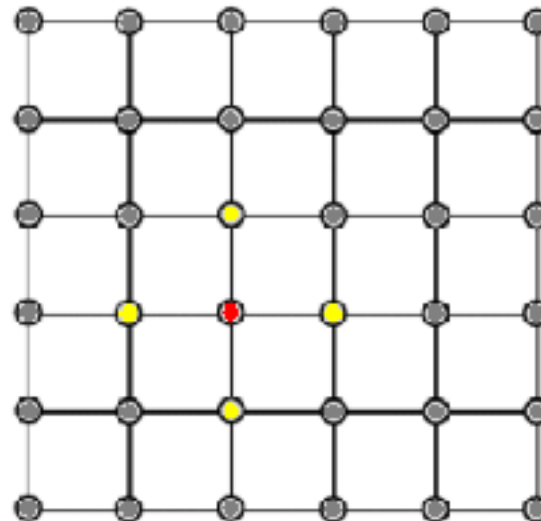


Génération aléatoire de mousses

Algorithme de Fast-Marching

Principe de propagation du front :

initialisation



KNOWN
TRIAL
FAR

TRIAL : points prenant le statut « à calculer »
et recevant une première valeur approchée de leur distance
(initialisation : voisins des **KNOWN**, distance =1)





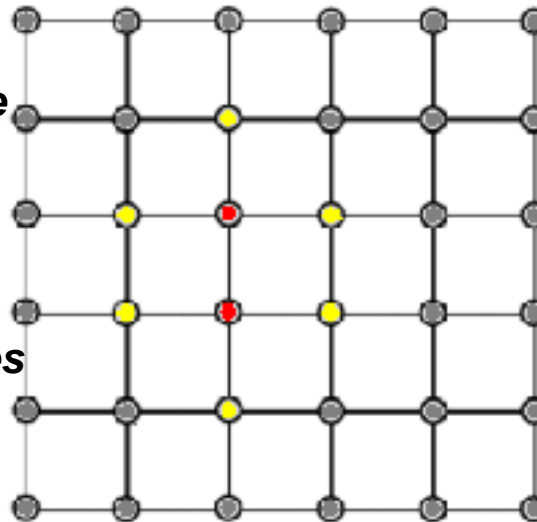
Génération aléatoire de mousses

Algorithme de Fast-Marching

Principe de propagation du front :

Calcul :

- 1) On prend le **TRIAL** présentant la distance approchée minimale,
- 2) Calcul de sa distance,
- 3) Il devient **KNOWN**, et ses voisins **TRIAL**.



KNOWN
TRIAL
FAR

Système à résoudre (en 2D) pour le calcul de la distance en un point en fonction de son voisinage:

$$\frac{1}{F^2} = \begin{cases} \max(T - T_{i-1,j}, T - T_{i+1,j}, 0)^2 + \\ \max(T - T_{i,j-1}, T - T_{i,j+1}, 0)^2 \end{cases}$$



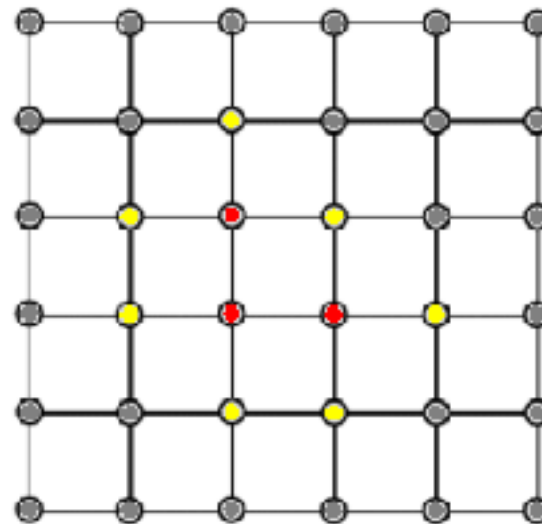


Génération aléatoire de mousses



Algorithme de Fast-Marching

Principe de propagation du front :



KNOWN
TRIAL
FAR

Ainsi de suite...



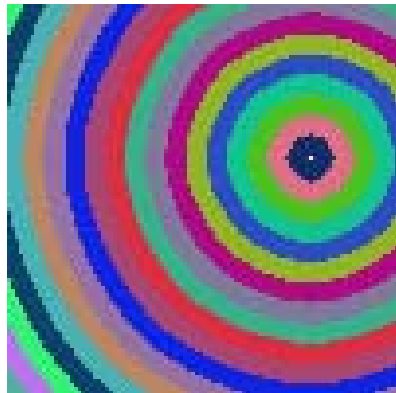


Génération aléatoire de mousses

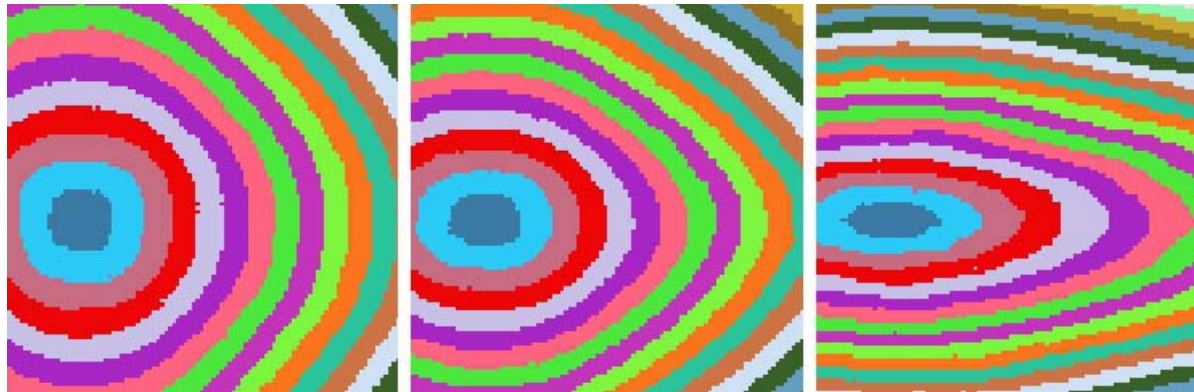


Algorithme de Fast-Marching

Résultats :



Fast-Marching isotrope (FM)



Fast-Marching Anisotrope (FMA)

Schéma numérique plus complexe permettant d'envisager : génération de mousses anisotropes, distribution de taille de pores (avec un ensemencement adapté), gradients de taille de pores...

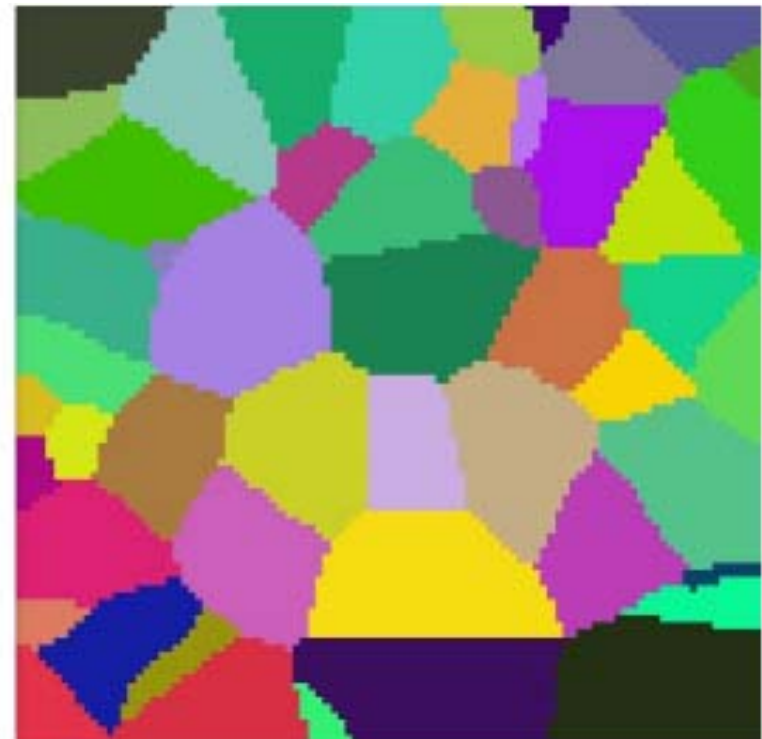
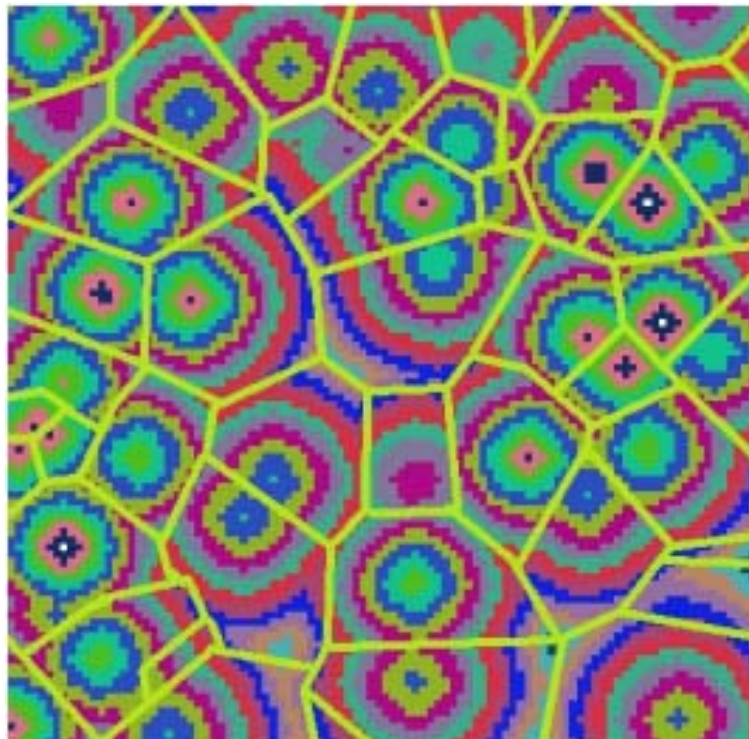




Génération aléatoire de mousses

Ligne de partage des eaux

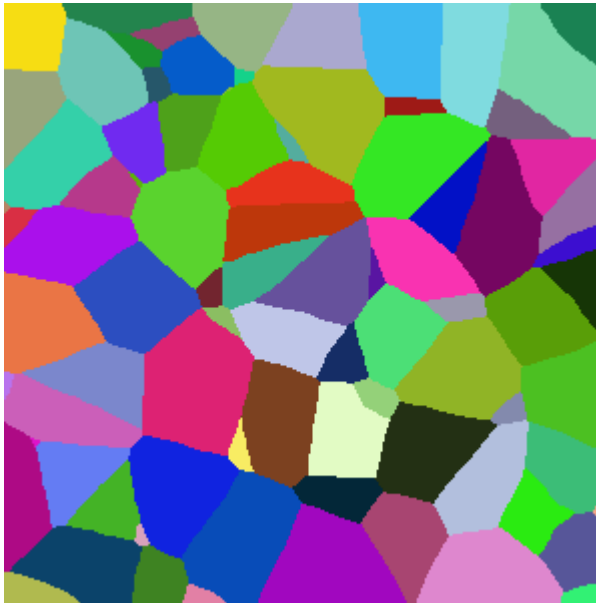
Segmentation des cellules à partir de la
carte de distance :





Génération aléatoire de mousses

Squelettisation



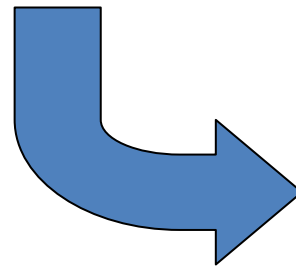
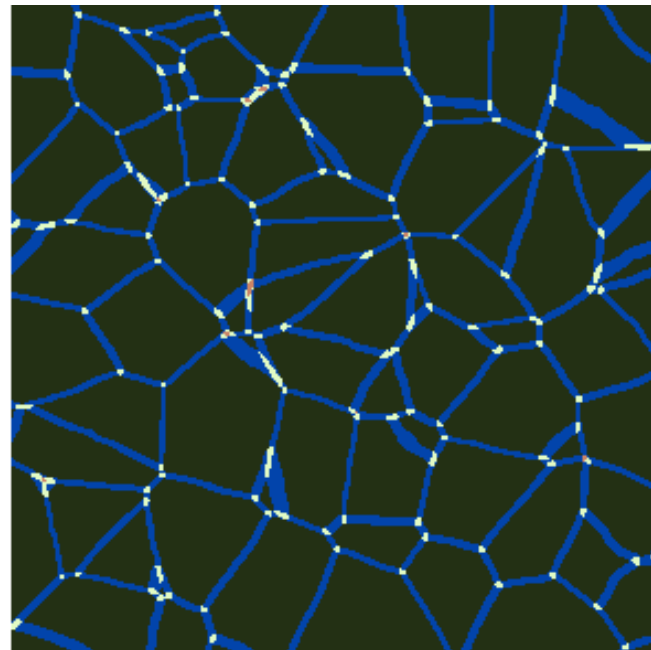
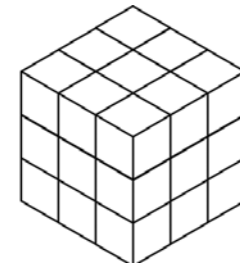
On sonde le voisinage de chaque voxel (connexité 26)

Interface entre...

2 cellules : **Membrane**

3 cellules : **Brin**

4 cellules : **Nœud**

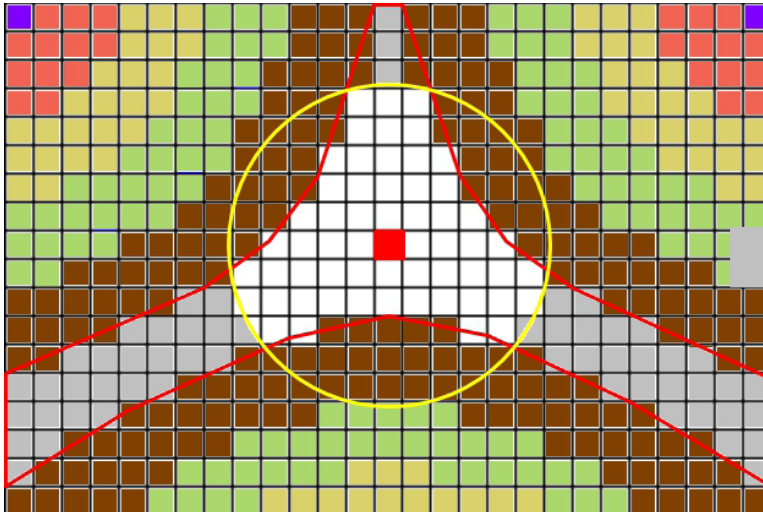




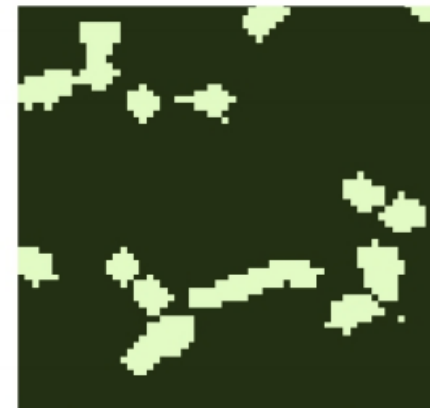
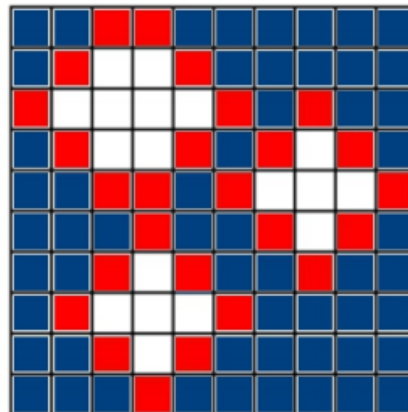
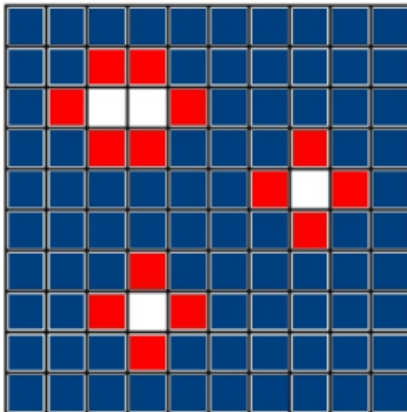
Génération aléatoire de mousses

Croissance / dilatation du squelette

- Par dilatation avec la carte de distance (2 critères)



- Par morphologie mathématique



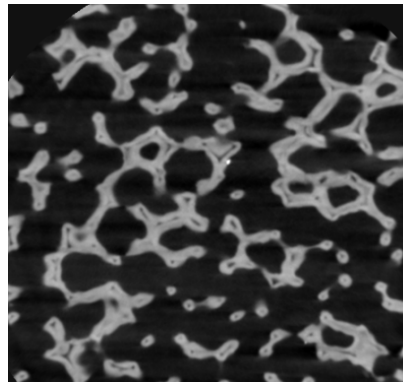


Génération aléatoire de mousses

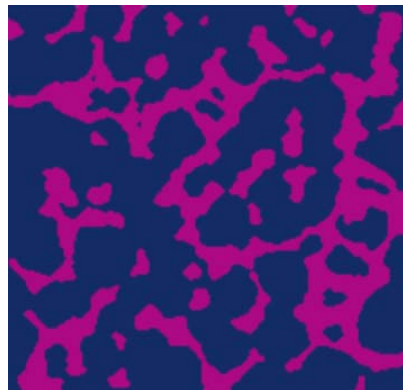
Reconstruction 3D par Marching-Cube

Comparaison du visuel entre mousse réelle (SiC B-12) et numériquement générée

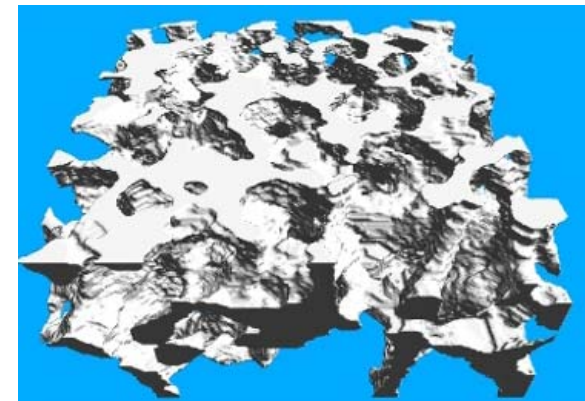
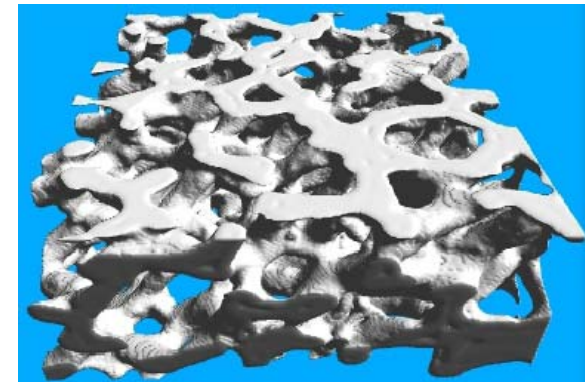
SiC B-12



**Mousse
numérique**



Tranche 2D de l'image 3D



Reconstruction 3D

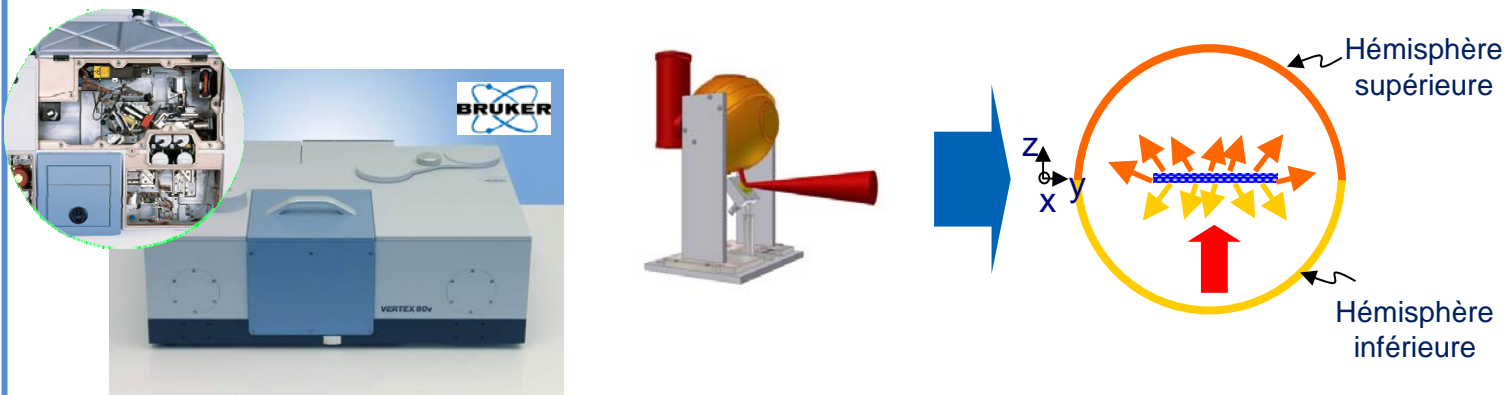




Comparaison des propriétés thermo-radiatives

Caractérisation expérimentale de la mousse B-12 ($e=11\text{mm}$)

Dispositif de mesure du spectre d'émittance normale hémisphérique : spectromètre à infrarouges Vertex 80 v (Bruker Optics, Elltingen, All.).



Extraction de n et k : méthode inverse avec modèle de Drude Etendu (fonction diélectrique)

Simulation sur mousse virtuelle ($e=9\text{mm}$) par Tir de Rayon, méthode de Monte Carlo (MCRT)

Code de tir de rayon iMorphRad (J.Vicente IUSTI, Benoit Rousseau) en prenant les n et k déterminés précédemment.

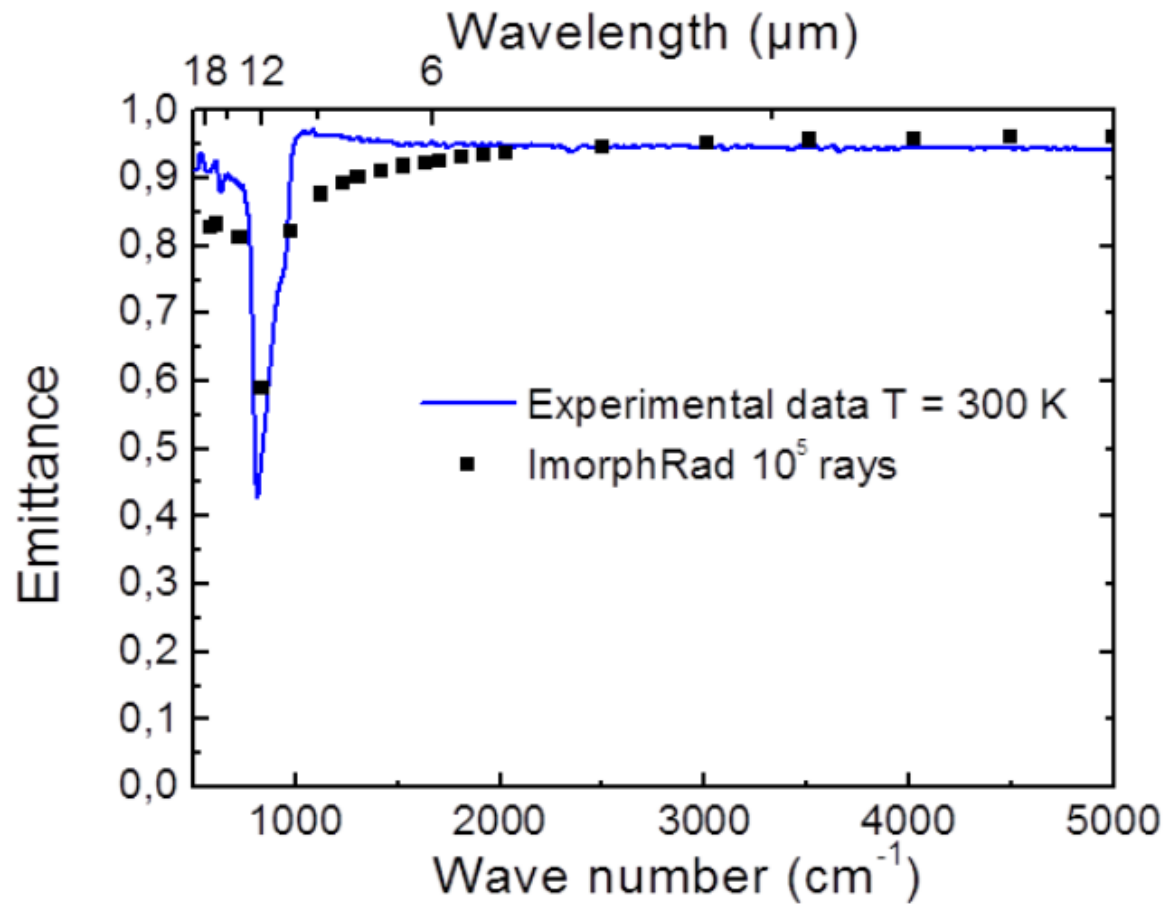




Comparaison des propriétés thermo-radiatives



Spectre d'émittance normale



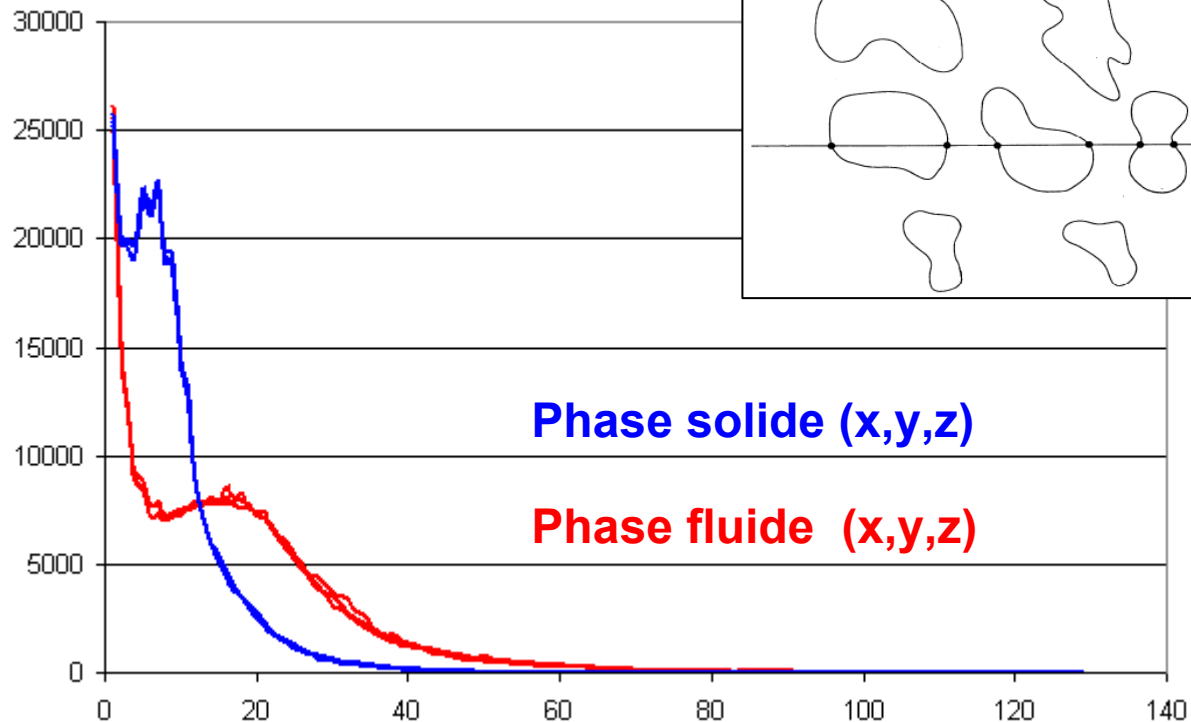
données expérimentales (mousse B-12) ■ Simulation iMorphRad (mousse virtuelle)



Caractérisation géométrique de la mousse virtuelle

Fonction de distribution de longueur de corde

Effectifs pour 10^5 tirs



Phase solide (x,y,z)

Phase fluide (x,y,z)

Longueur interceptée (voxels)



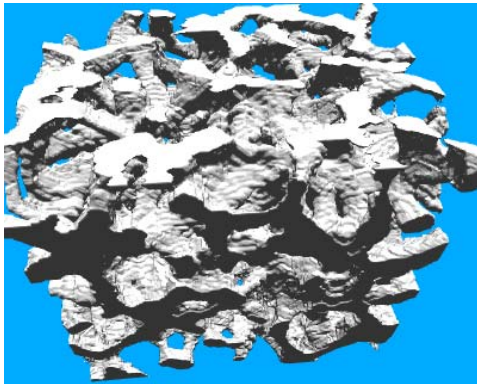
Mousse géométriquement isotrope



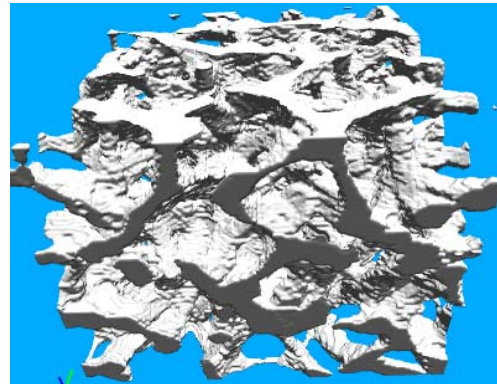


Conclusion

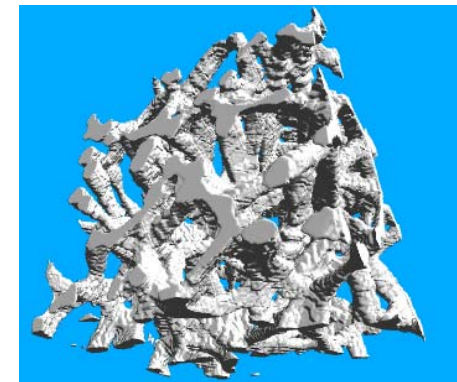
- Développement d'un générateur de mousses virtuelles en C++:
Genfoam (Isotrope/Anisotrope)
- Génération de mousses de porosités différentes :



$\Phi = 67\%$



$\Phi = 73\%$



$\Phi = 81\%$

- Bonne adéquation entre les mousses numériques et les données expérimentales malgré un désaccord aux alentours des $k=1000\text{cm}^{-1}$:
modélisation des propriétés optiques du SiC perfectible



Perspectives

- **Mieux caractériser les mousses statistiquement**
fonction d'autocorrélation de paire (x,y,z) ,
distribution de longueur de cordes (x,y,z) ,
distribution de taille de pores/brins,
...
- **Relier une éventuelle anisotropie optique à une anisotropie géométrique,**
- **Mieux déterminer les fonctions optiques du SiC,**
- **Ajouter une couche mince sur les brins (SOLGEL),**
- **Réunion ANR OPTISOL au PROMES,**
- **Proceedings à venir : JEMP Marseille 10/2012,
ICFMEME Pékin 12/2012.**





UNIVERSITÉ DE NANTES



Merci pour votre attention!

