



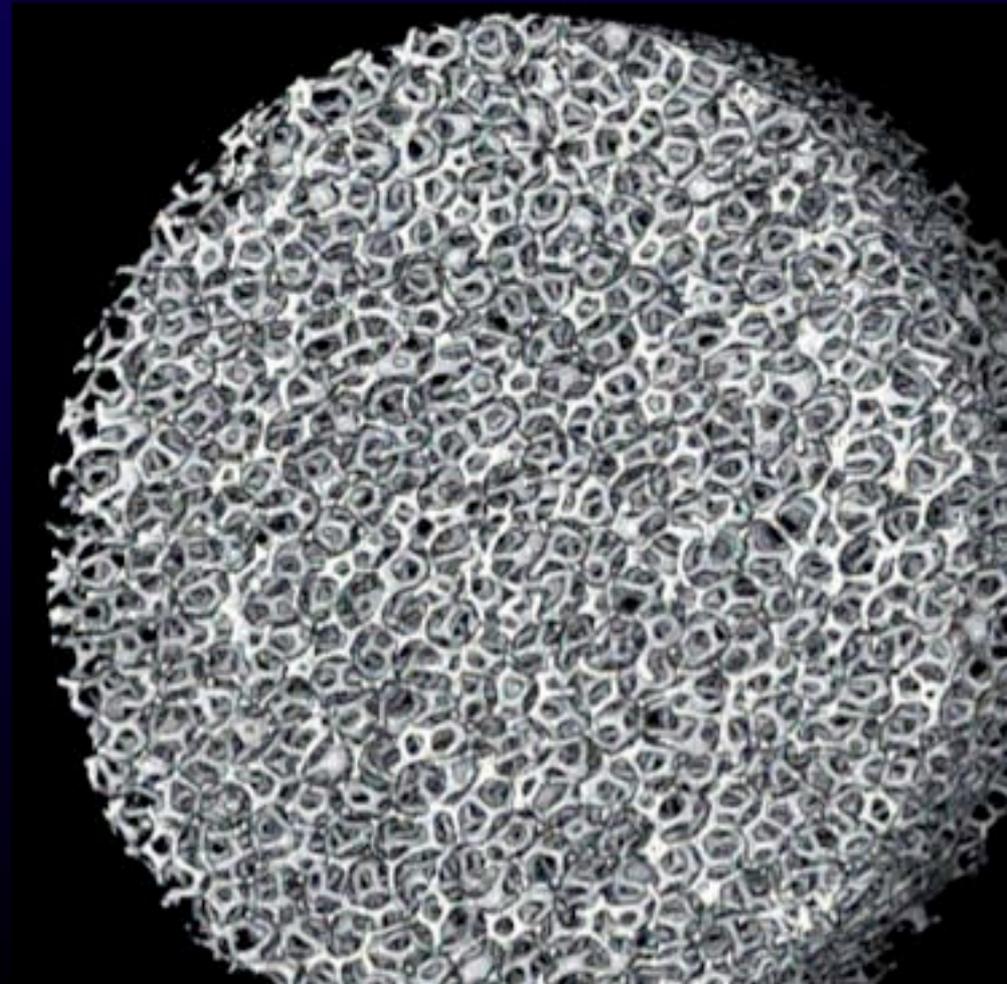
Conductivité effective de mousses métalliques : quel VER et que mesure-t-on ?

J.M. Hugo

J.L. Gardarein

F. Rigollet

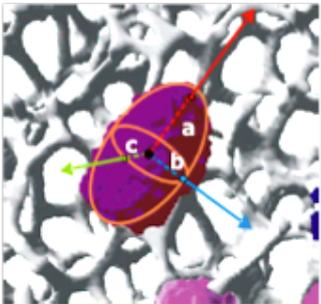
F. Topin



Approche

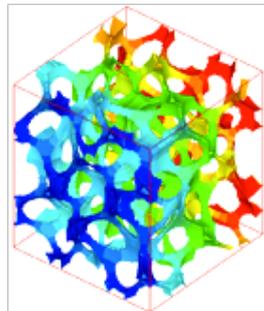
Morphological Characterisation

- 3D morphology
- Advanced morphometry



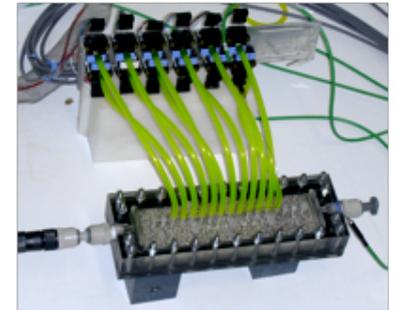
Numerical Simulation on real Geometry

- Heat Transfer
- Fluid flow
- Mixing



Experimental Measurement

- Fluid flow law
- Heat transfer
- Catalysis



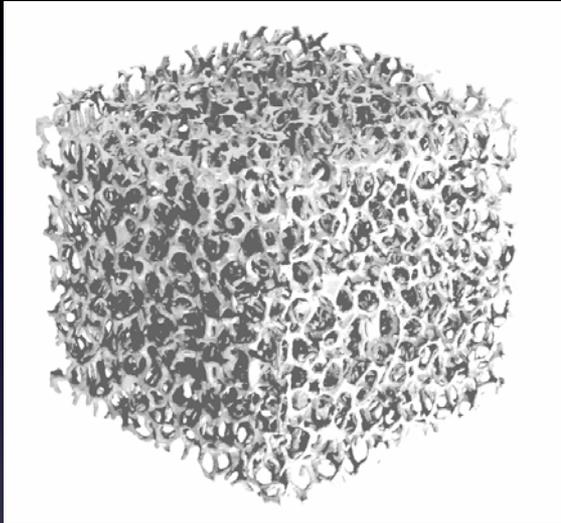
Structure



Transfer properties

Quelques exemples de mousses

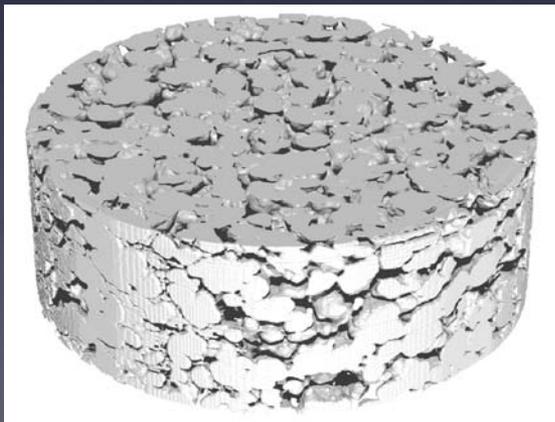
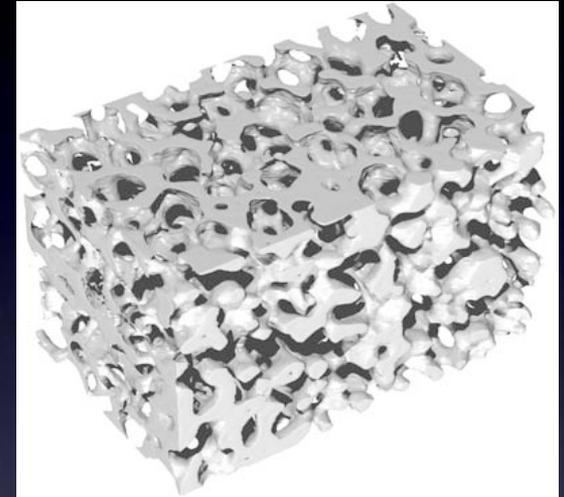
**NiCr foams – Recemat
(10,20,30,40,50,100 ppi)**



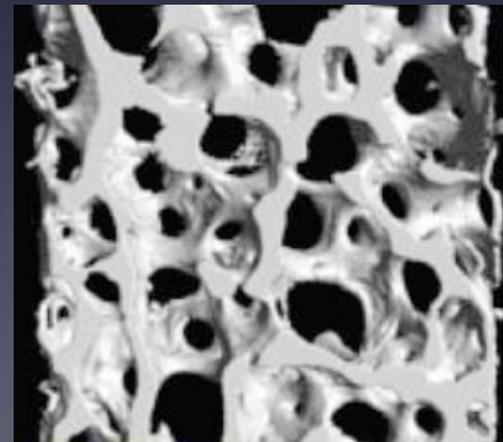
Al foams – ERG (5,10,20 ppi)



Ceramic foams

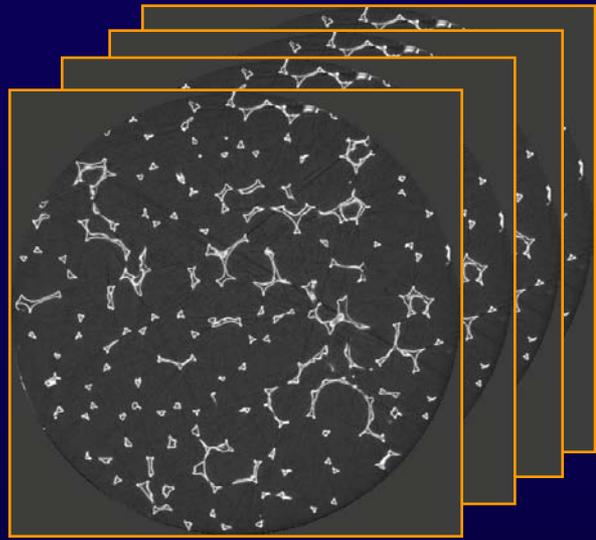


Sintered Polyethylene - Porvair



Trabecular bone

Mesures géométriques : iMorph



Segmentation des phases:
solide/ fluide

Reconstruction 3D

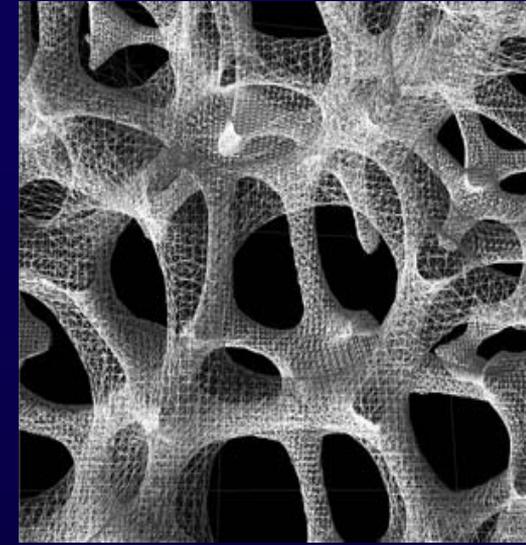
Tessellation de l'interface

Visualisation

Porosité

Surface spécifique

Exportation vers les codes CFD

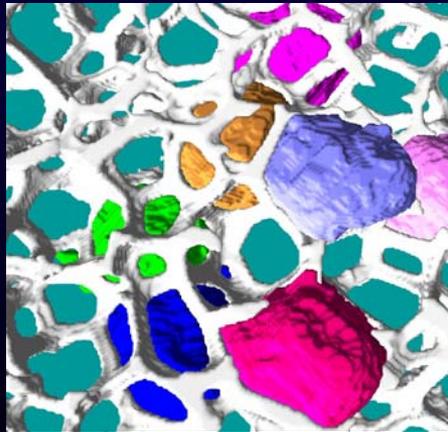


Extraction des éléments structurants

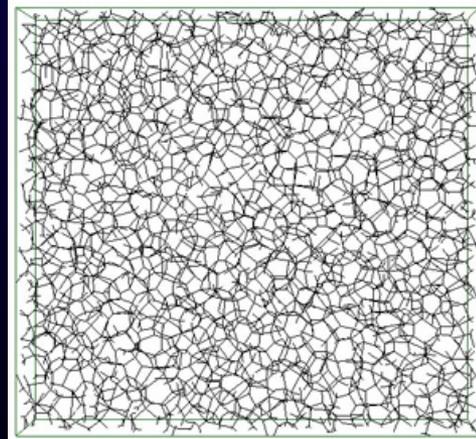
Cellules

Réseau de brins

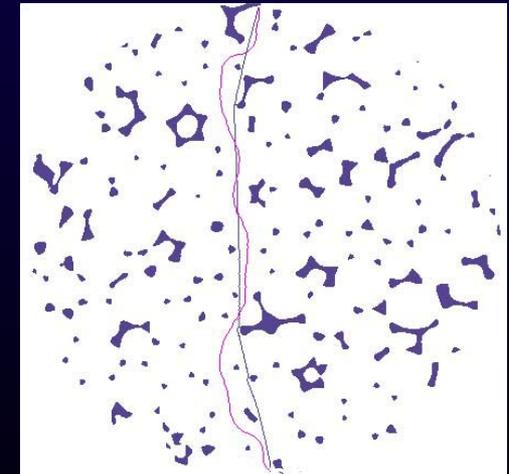
Calculs Géodésiques



Porosimétrie
Forme des pores
Orientations



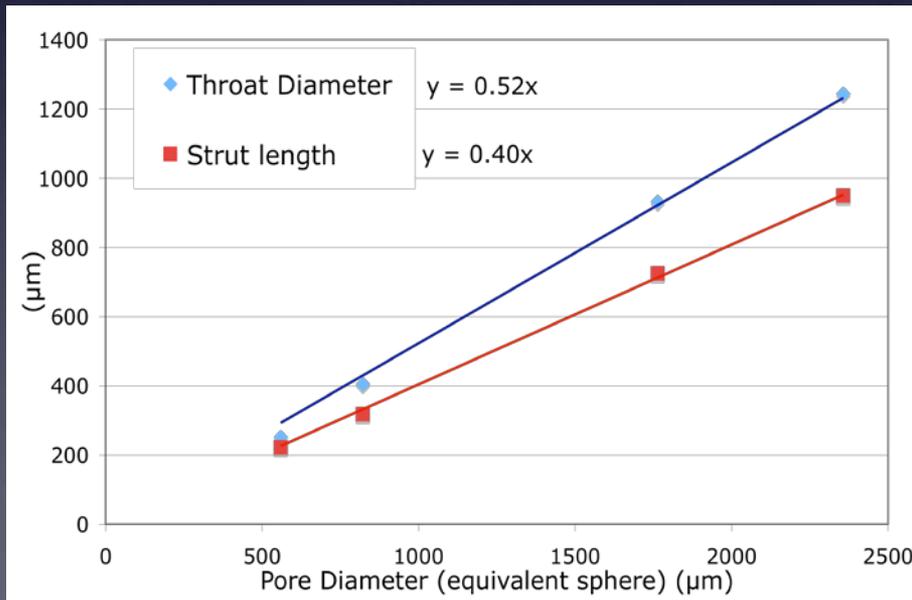
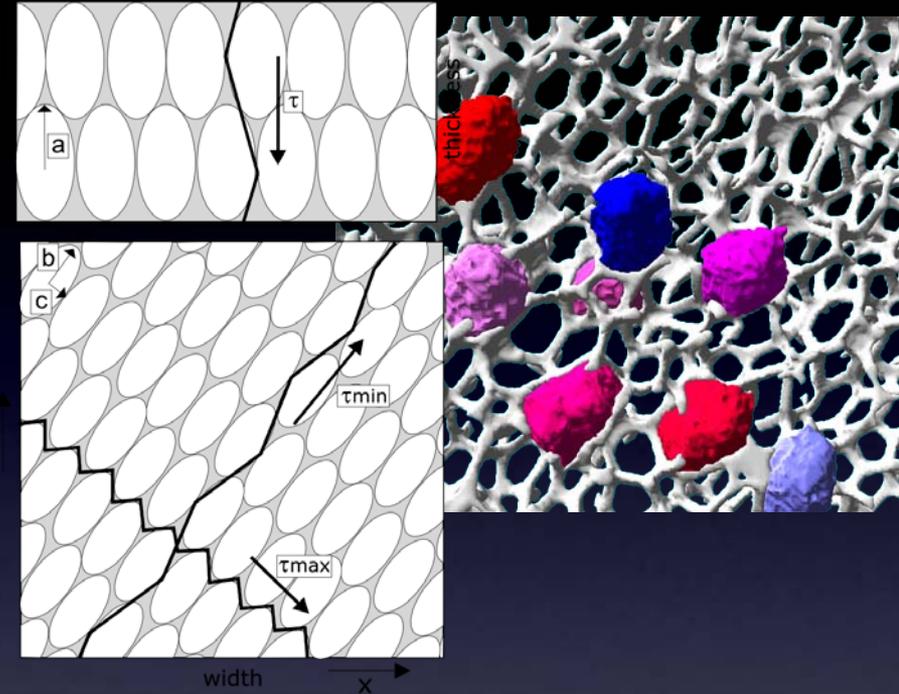
Orientations
Connectivité
Longueurs



Plus courts chemins
Tortuosité

En Bref

- Cells present ellipsoid shape
- Cells organization induces anisotropy
- Geometrical tortuosity depends on cells orientation and organisation
- Foams are roughly homothetic



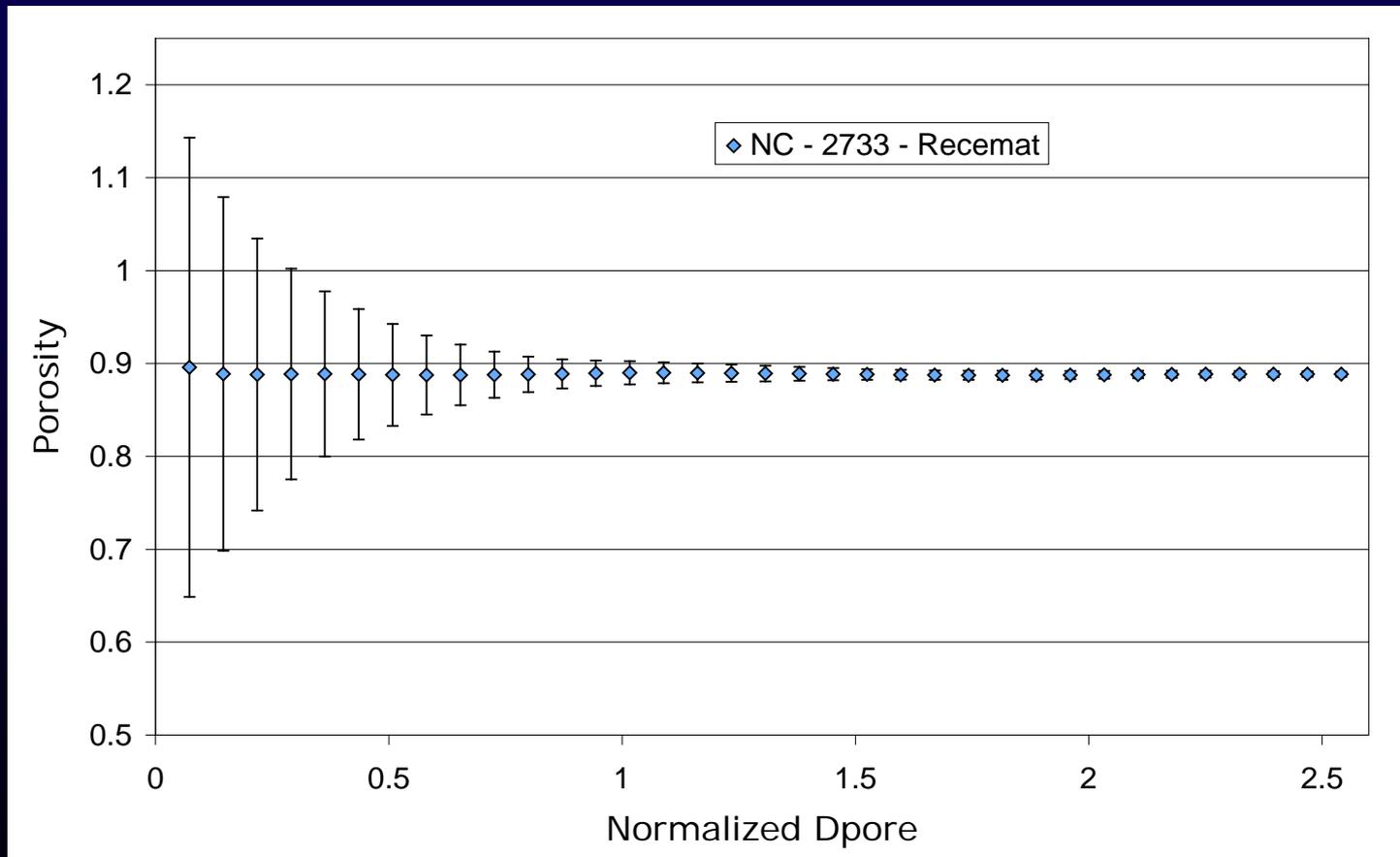
Structural dependencies

$$S_p = 3/d_{\text{Pore}}$$

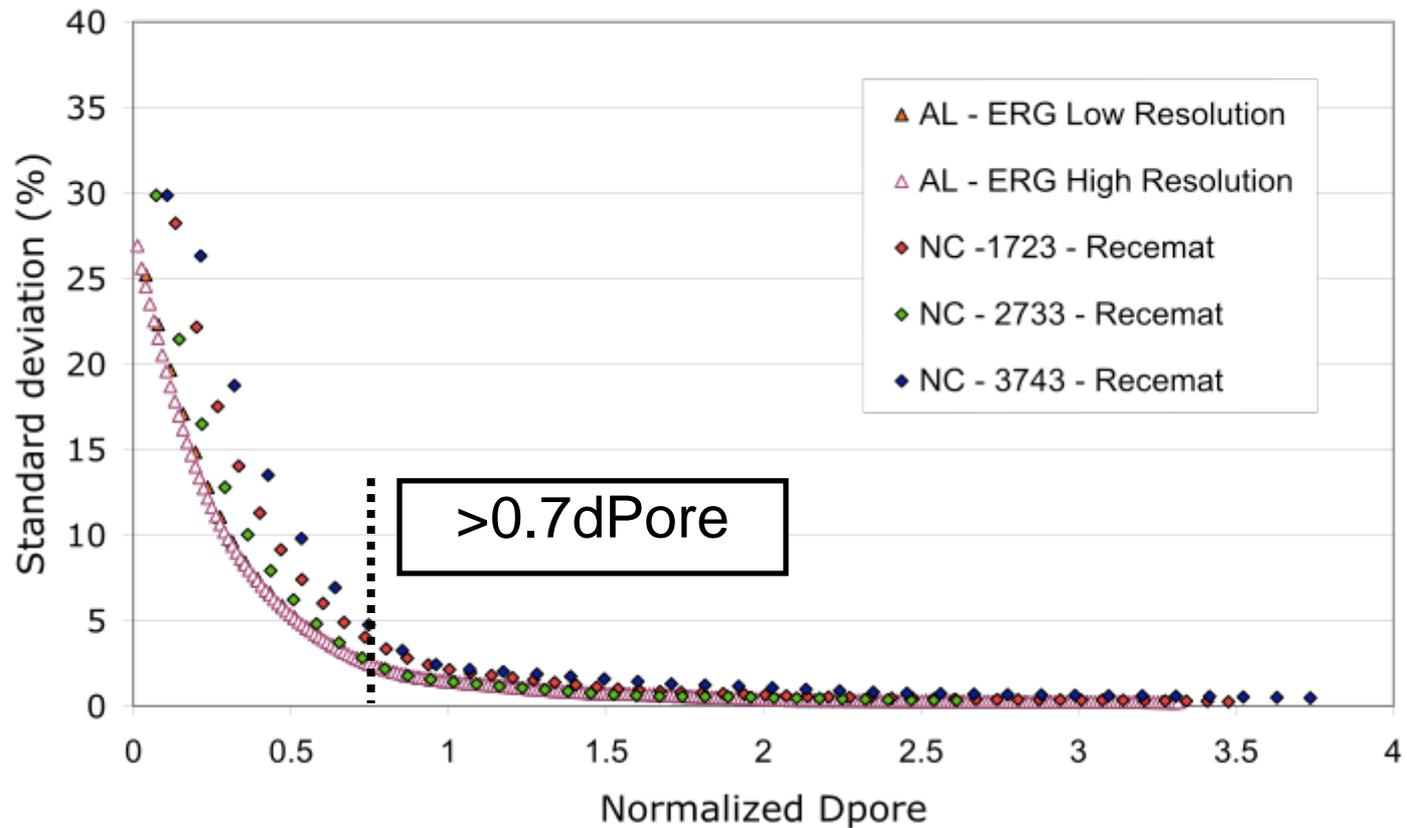
$$d_{\text{Throat}} = 0.52 d_{\text{Pore}}$$

$$\text{Strut length} = 0.4 d_{\text{Pore}}$$

VER de porosité

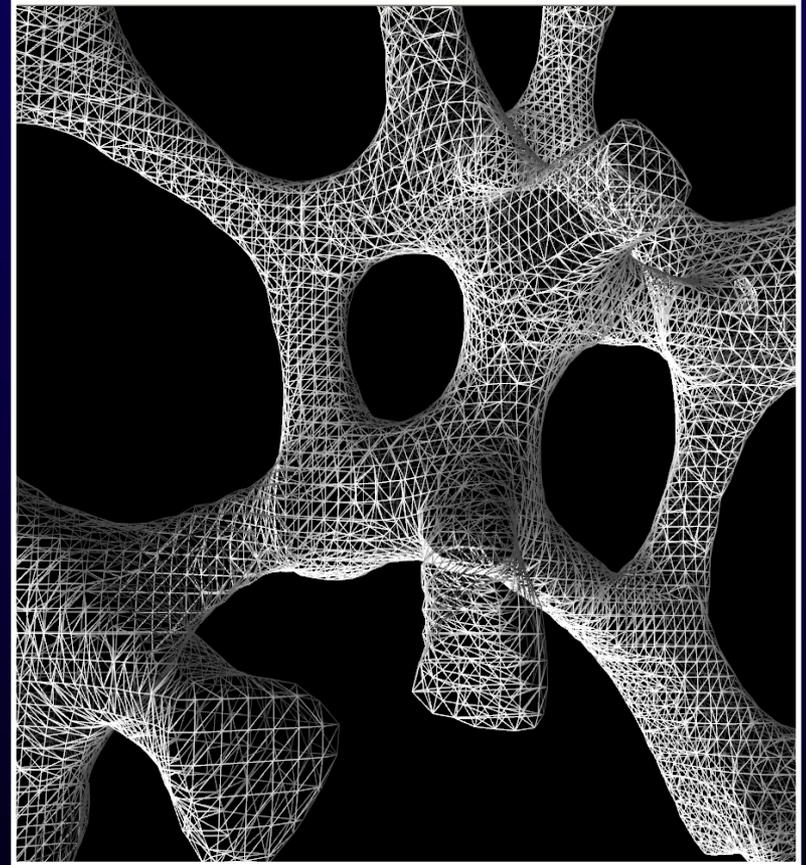


VER de porosité (II)

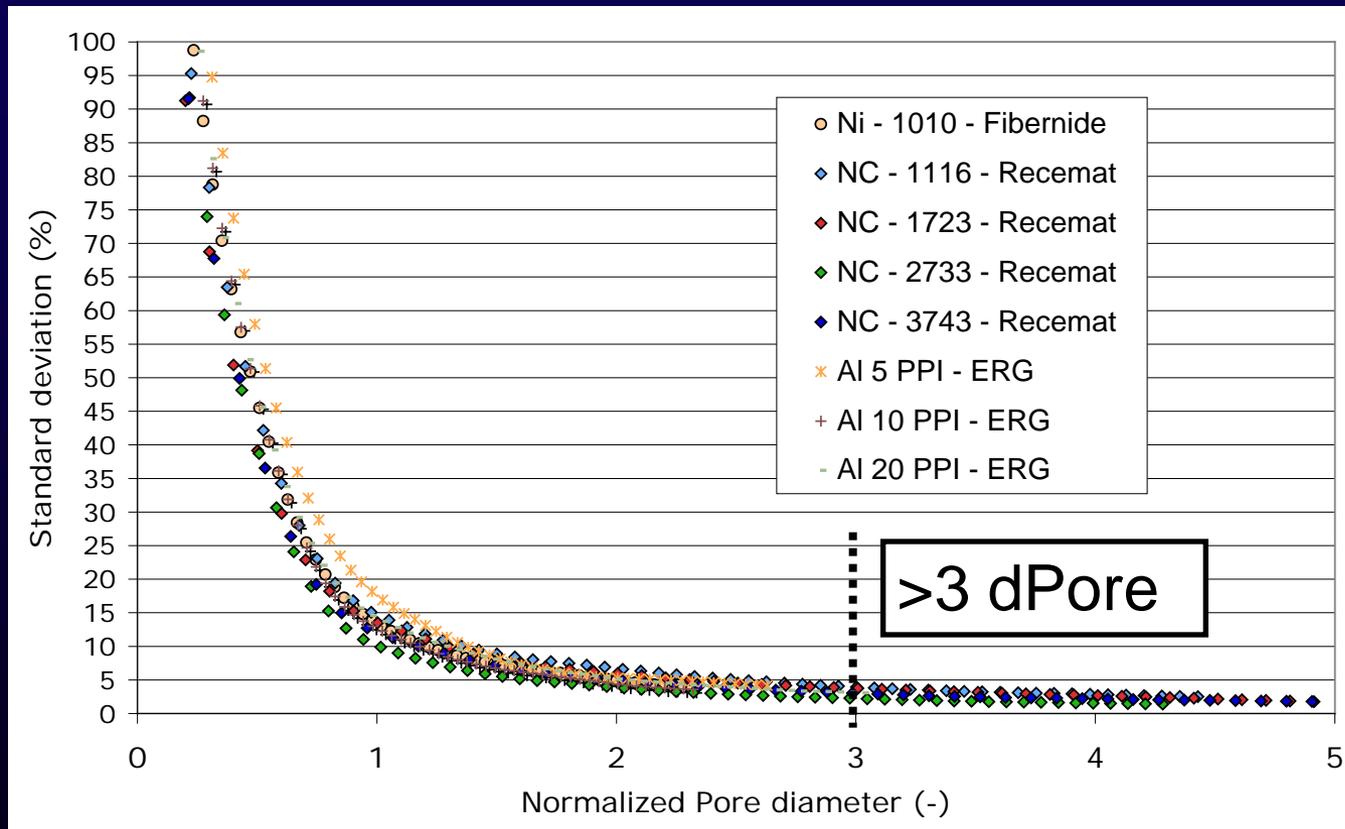


Mesh Construction for specific surface calculation

- Isodensity surface calculation with the "Marching Cubes" Method
- Mesh triangles are data ordered
 - each triangle is included into a small cube
 - each contains a maximum of 4 triangles



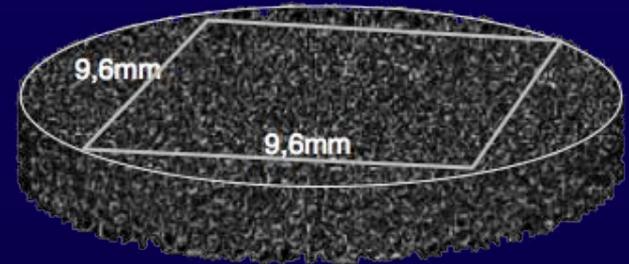
Rve of Specific surface



same behavior for Fibernide, Recemat and ERG foams

Conductivité thermique effective

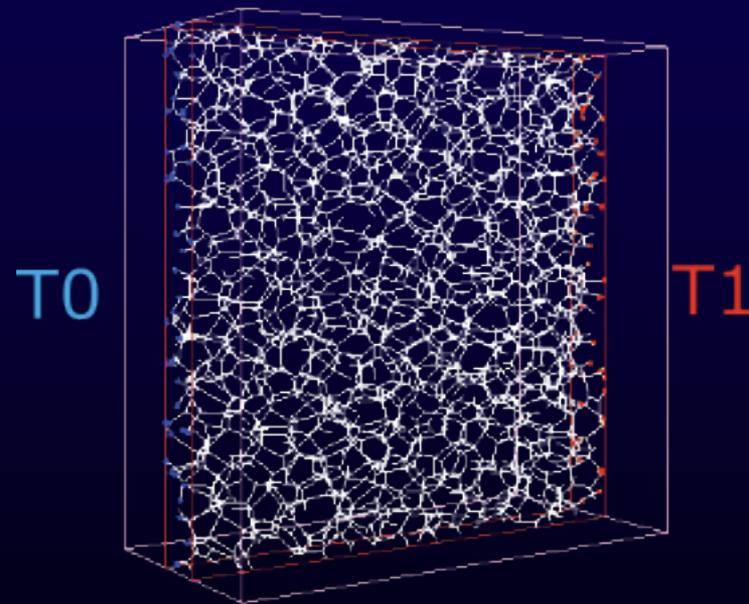
$$\frac{1}{V} \int q(x) dV = -\mathbf{K} \frac{1}{V} \int \nabla T(x) dV$$



Pour les 3 directions :

- Calcul des champs de température
- Calcul des flux de chaleurs

Obtention du tenseur de conductivité



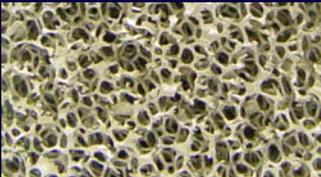
$$\sum_{\substack{j \in \text{Nodes} \\ \text{connected to } p}} \Phi_{pj} = \sum_{\substack{j \in \text{Nodes} \\ \text{connected to } p}} -\frac{k_{pj}}{l_{pj}} S_{pj} (T_j - T_p) = 0$$

Approche expérimentale

- Mesurer “directement” la conductivité apparente dans 3 directions
 - Résultats présentés direction épaisseur
- Mesurer le tenseur de conductivité (en cours)

Les mousses étudiées : mousses d'aluminium ERG

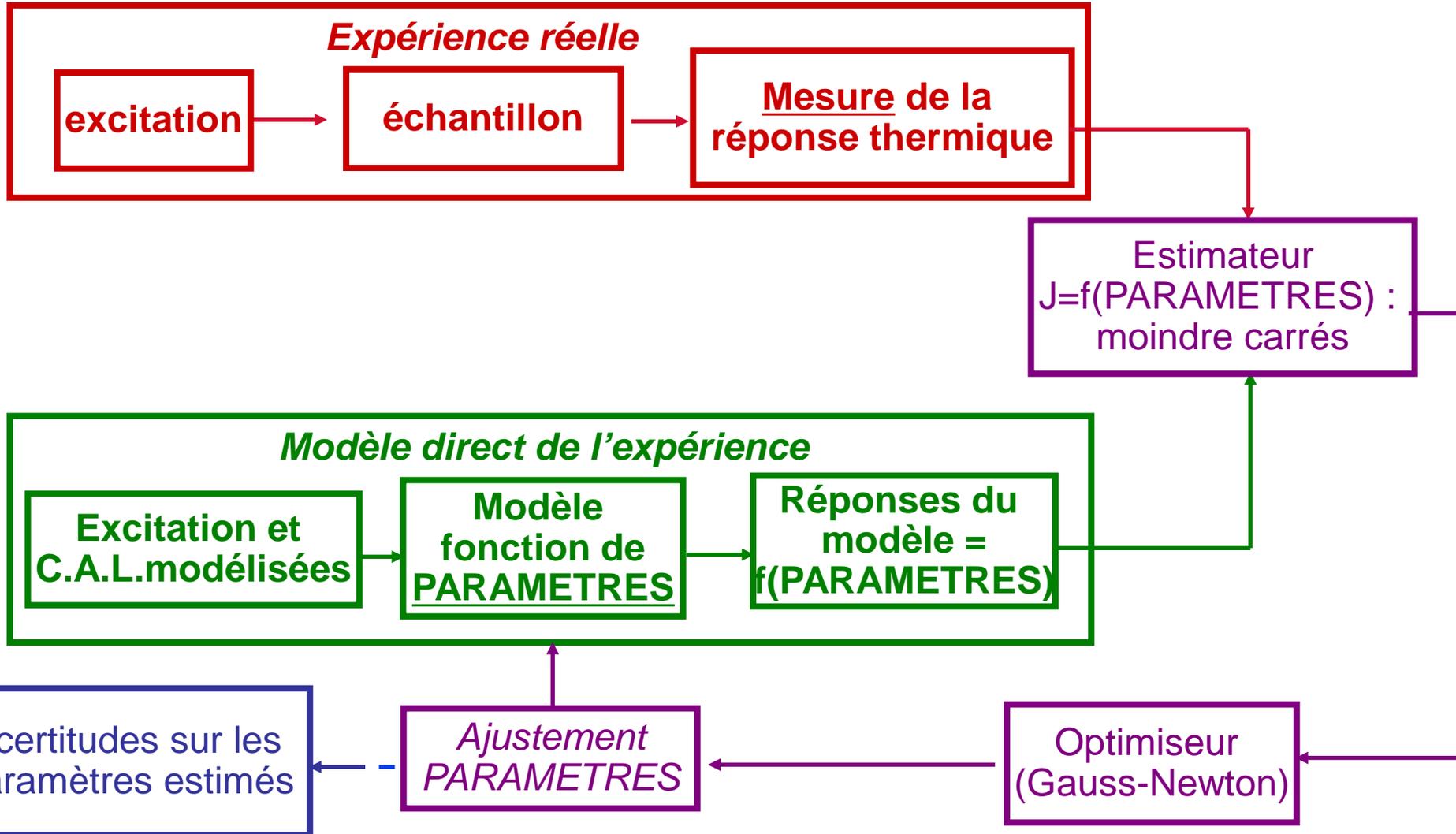
Blocs de 50×50×100mm³

	PPI		Taille moy. pores	ρ	ρC_p	ε
	/		mm	kgm ⁻³	Jm ⁻³ K ⁻¹	/
Mousse A	10		2.5	225.6	201 716 ± 2%	0.917 ± 1%
Mousse B	20		1.3	174.6	155 827 ± 2%	0.936 ± 1%
Mousse C	40		0.6	256.5	230 699 ± 2%	0.905 ± 1%

$$\varepsilon = \frac{\rho_{alu} - \rho_{mousse}}{\rho_{alu} - \rho_{air}}$$

$$\rho C_{mousse} = \varepsilon \cdot \rho_{air} C_{air} + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_{alu} C_{alu}$$

Problème inverse d'estimation de paramètres



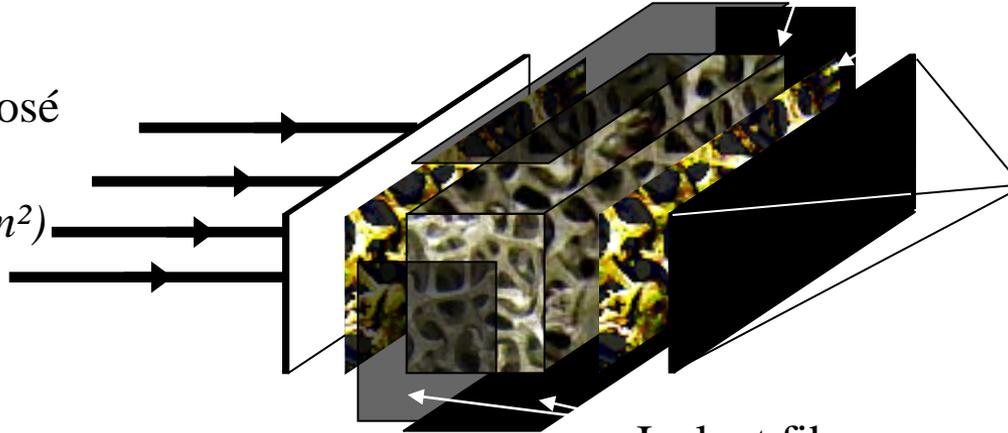
L'expérience photothermique

Semelle en alu
(ep. $11\mu\text{m}$)

Bloc de mousse

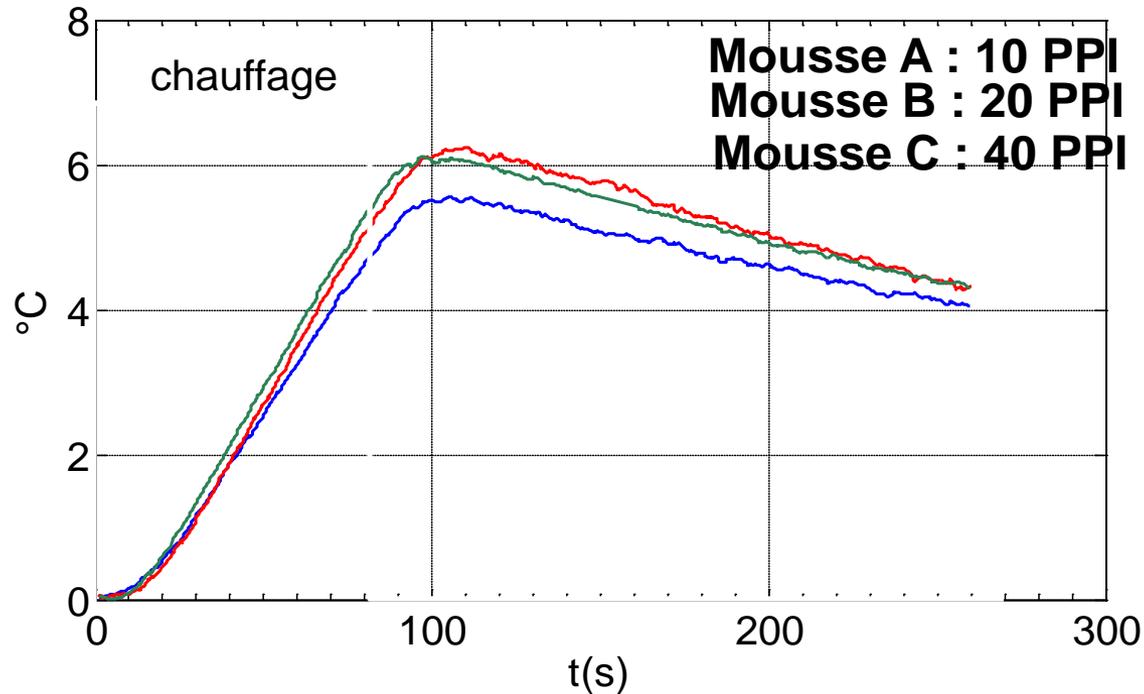
Graisse conductrice (au Cu)

Flux uniforme imposé
pendant $t_c \approx 80\text{s}$
(halogène $< 1\text{kW/m}^2$)

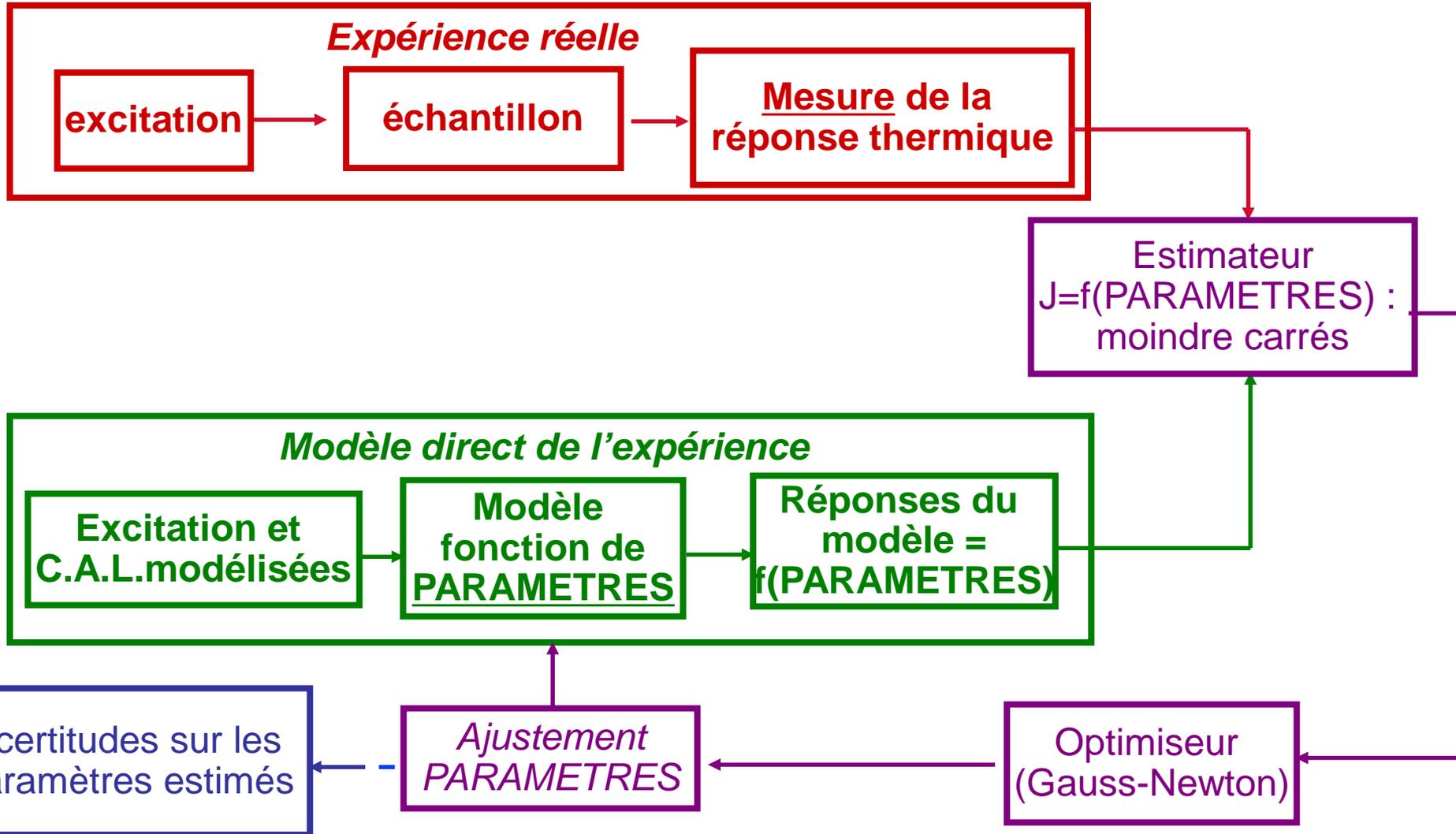


Caméra IR
(FLIR SC6000)

Isolant fibreux

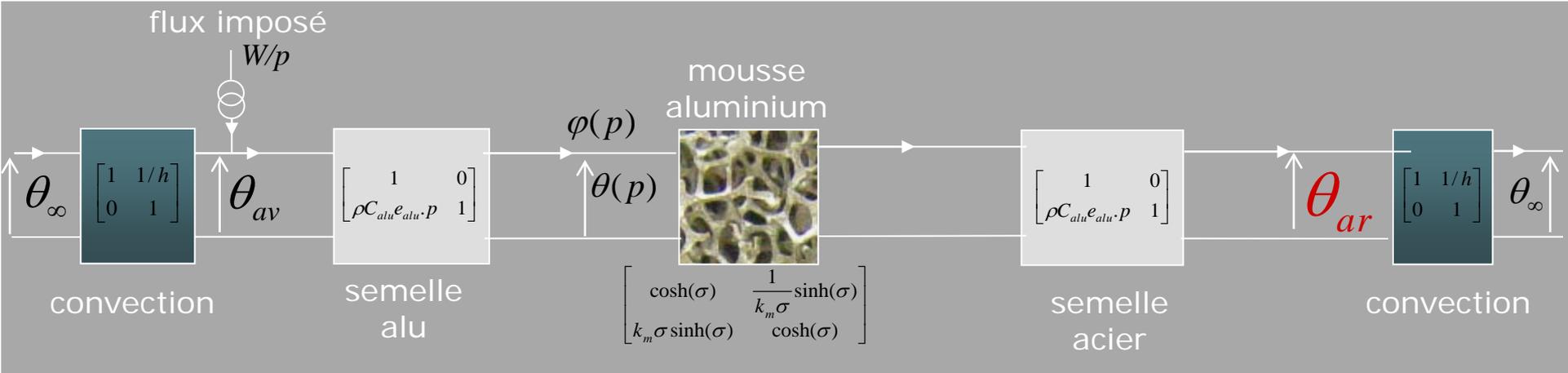


Problème inverse d'estimation de paramètres



Modélisation directe de l'expérience : quadripôles thermiques

Analogie électrique instationnaire dans l'espace de Laplace (p) puis retour numérique (t)



$$\eta = L^{-1}(\theta_{ar}) = f(t, \beta) \quad \text{avec} \quad \beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4)$$

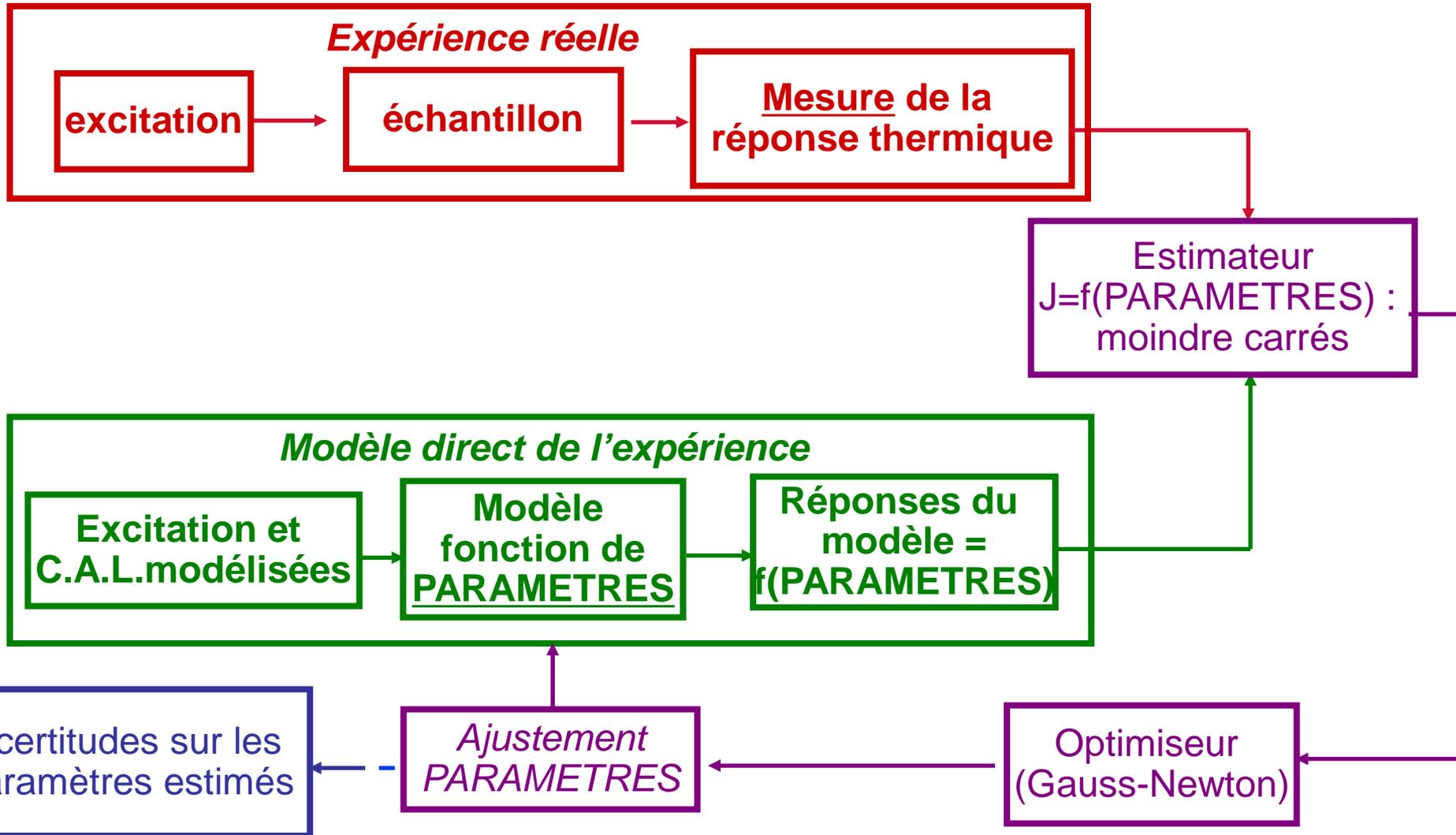
Paramètres	β_1	β_2	β_3	β_4
	s^{-1}	/	$K.s^{-1}$	/
Expression	α_m / e_m^2	$h e_m / k_m$	$W / \rho_m C p_m e_m$	$\frac{\rho_s C p_s e_s}{\rho_m C p_m e_m}$
Valeur nominale	10^{-2}	10^{-1}	$8 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$

($\sigma = \sqrt{p/\beta_1}$)

Paramètre d'intérêt car

$$\alpha_m = k_m / \rho C_m$$

Problème inverse d'estimation de paramètres



Sensibilités

Sensibilités réduites :

$$Z_k(t) = \beta_k X_k(t, \boldsymbol{\beta}) = \beta_k \frac{\partial \eta(t, \boldsymbol{\beta})}{\partial \beta_k} = \frac{\partial \eta(t, \boldsymbol{\beta})}{\frac{\partial \beta_k}{\beta_k}}$$

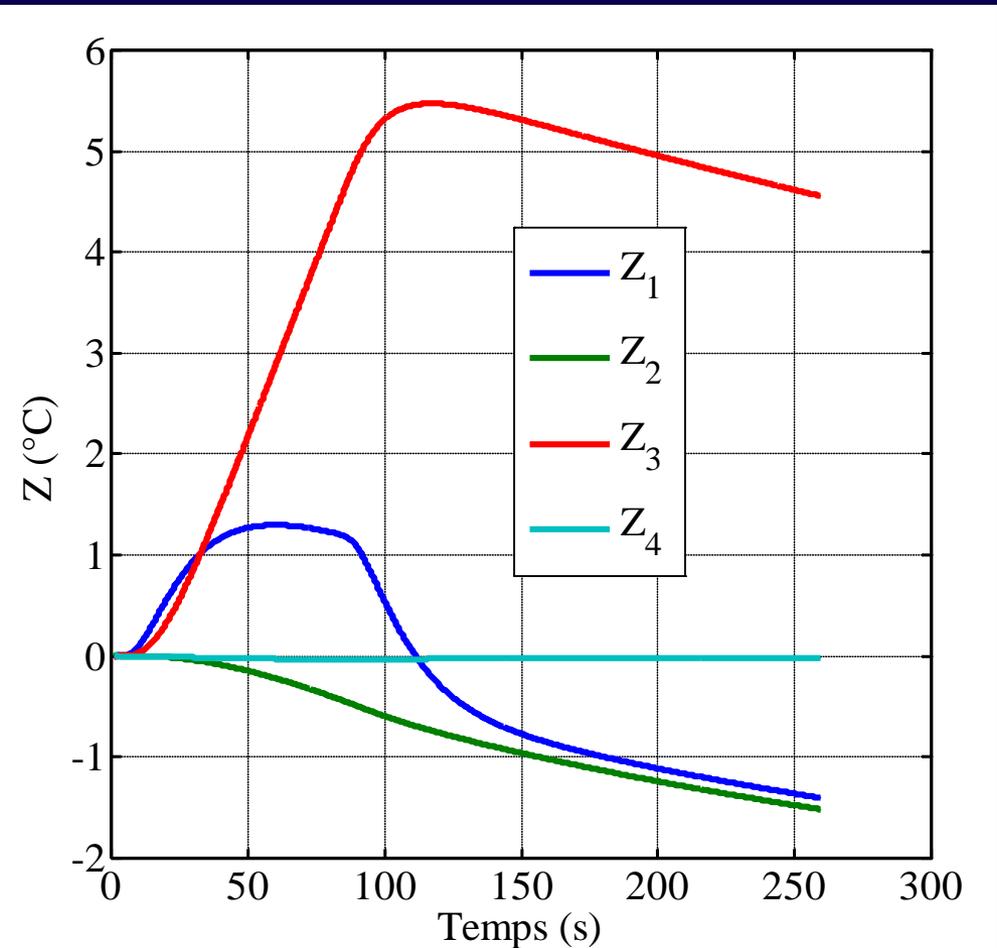
$$\beta_1 = \alpha_m / e_m^2$$

$$\beta_2 = h e_m / k_m$$

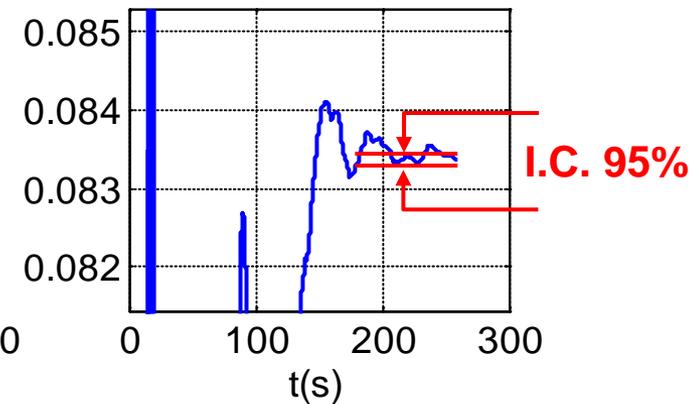
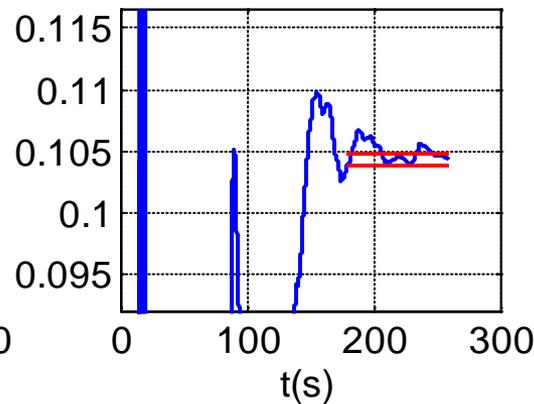
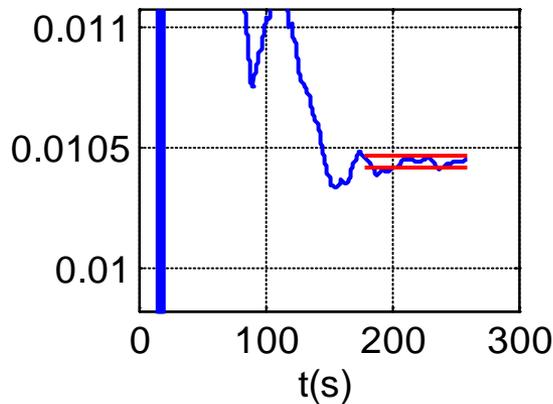
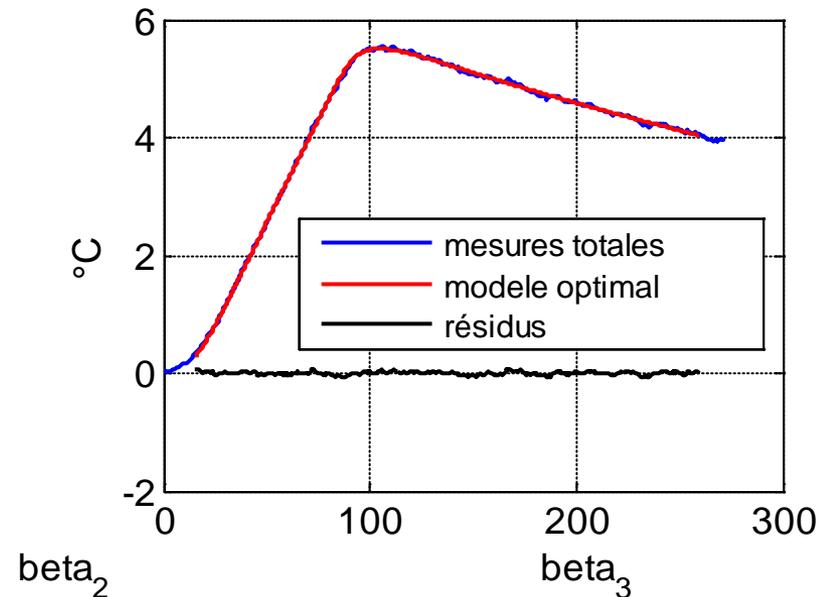
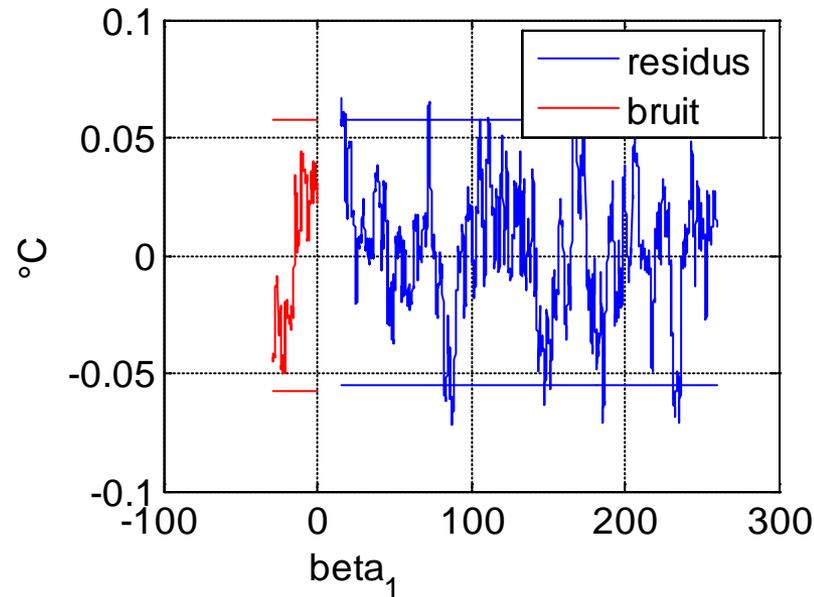
$$\beta_3 = W / \rho_m C p_m e_m$$

$$\beta_4 = \frac{\rho_s C p_s e_s}{\rho_m C p_m e_m}$$

→ Z_4 faible : β_4 fixé



Convergence, résidus, incertitudes



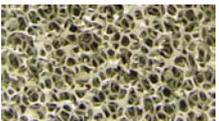
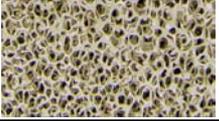
2 types d'incertitudes

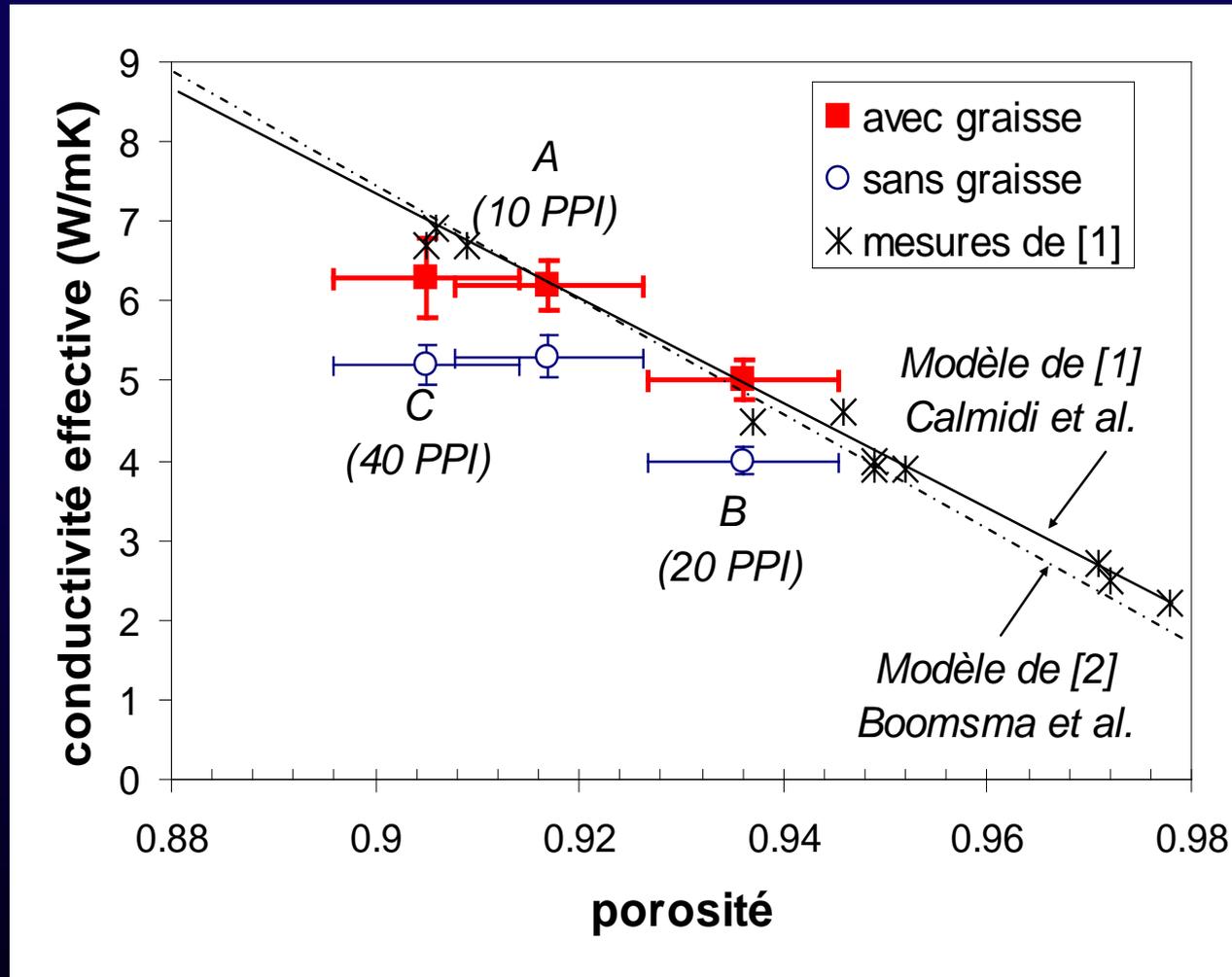
- Aléatoire : amplification du **bruit de mesure**
- Déterministe : amplification du **biais sur les paramètres fixés**



$$\beta_i \pm \Delta\beta_i$$

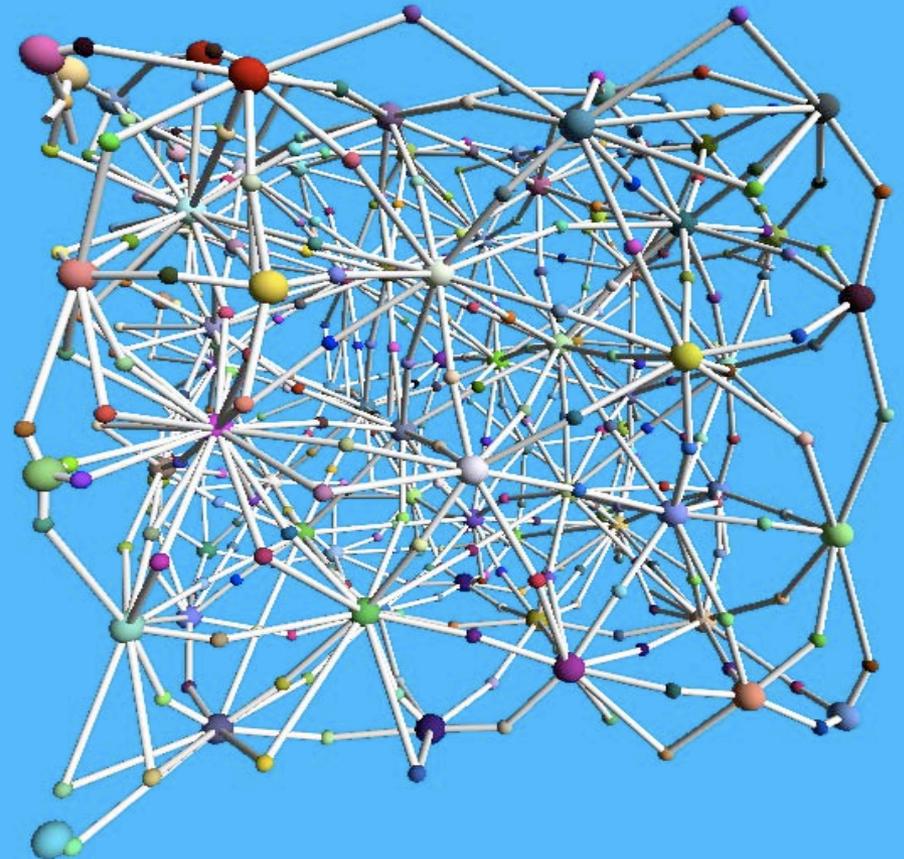
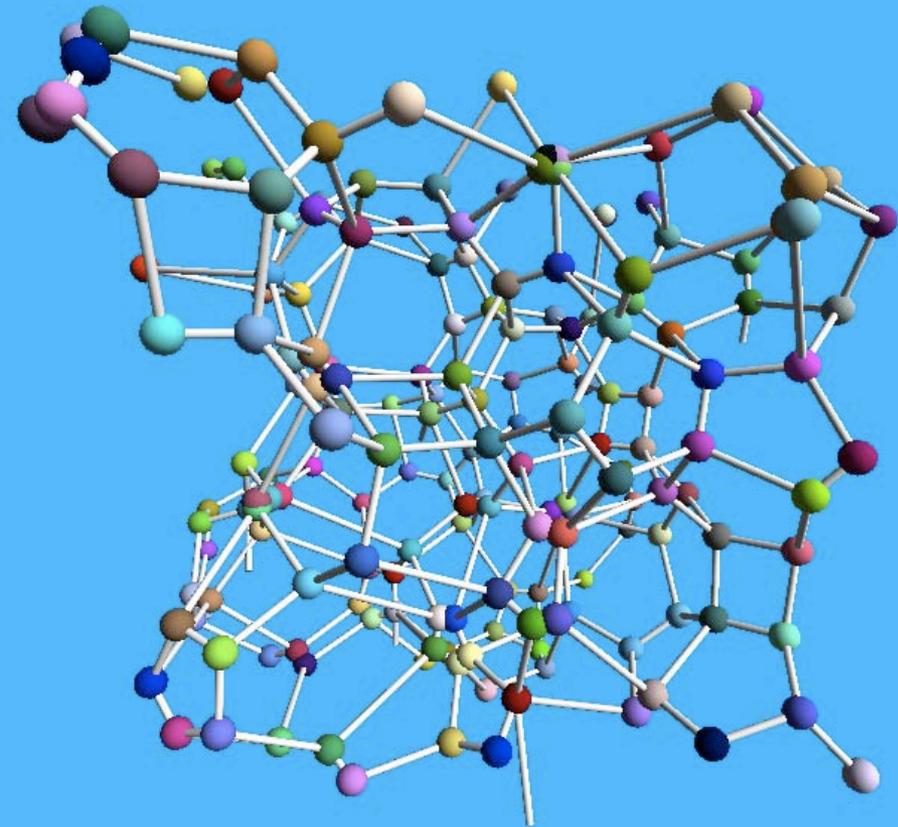
Résultats

		$\hat{\beta}_1 \times 10^3 \pm$ (IC + BI) %	$\hat{\beta}_2 \pm$ (IC + BI) %	$\hat{\beta}_3 \times 10^2 \pm$ (IC + BI) %	$\hat{\beta}_4 \times 10^3 \pm$ (IC) % (fixé)	$k \pm \Delta k$	$h \pm \Delta h$
Mousse		s^{-1}	/	$K.s^{-1}$	/	$W.m^{-1}.K^{-1}$	$W.m^{-2}.K^{-1}$
	A	$12.8 \pm$ (1.5 + 0.2) %	$0.12 \pm$ (2 + 0.1) %	$2.6 \pm$ (0.3 + 0.1) %	$2.7 \pm$ (20) %	6.2 ± 0.3	15 ± 1
	B	$13.3 \pm$ (1.5 + 0.3) %	$0.14 \pm$ (2 + 0.2) %	$3.1 \pm$ (0.3 + 0.1) %	$3.5 \pm$ (20) %	5.0 ± 0.3	14 ± 1
	C	$11.3 \pm$ (4 + 0.2) %	$0.09 \pm$ (20 + 0.1) %	$1.9 \pm$ (3 + 0.1) %	$2.3 \pm$ (20) %	6.3 ± 0.5	12 ± 3

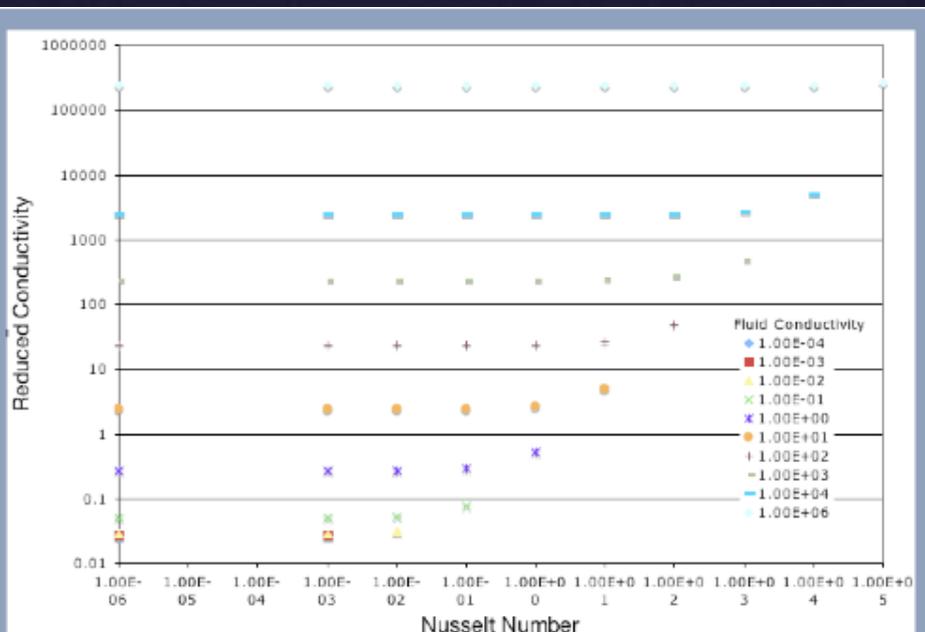
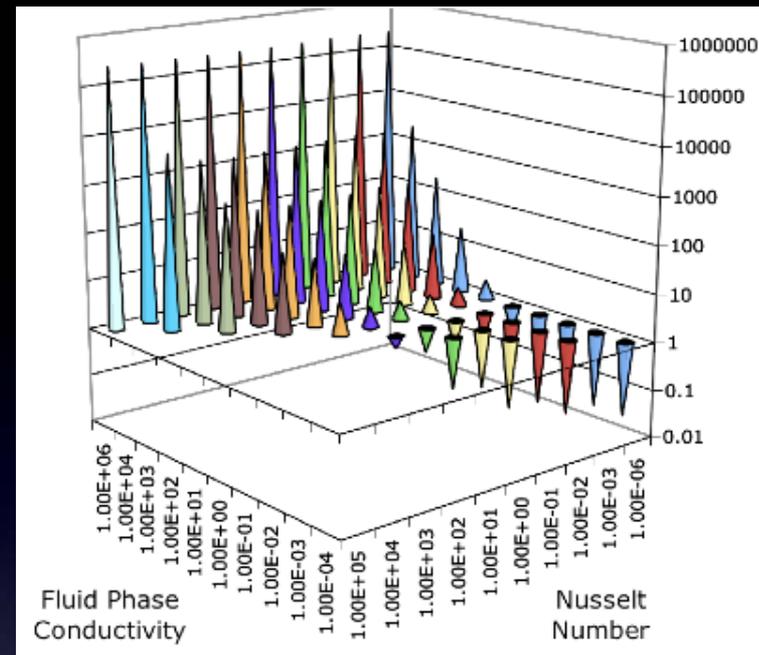
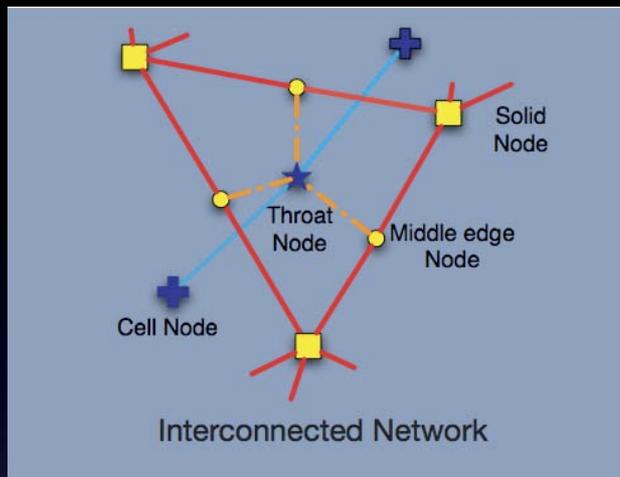


Bonne confiance dans nos mesures

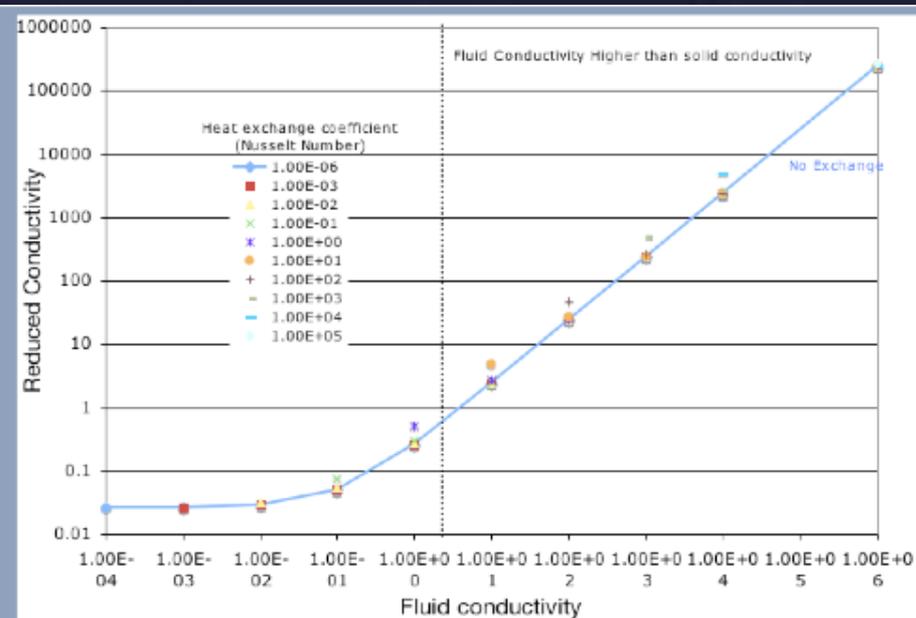
Réseaux solide & fluide



Fluid phase :

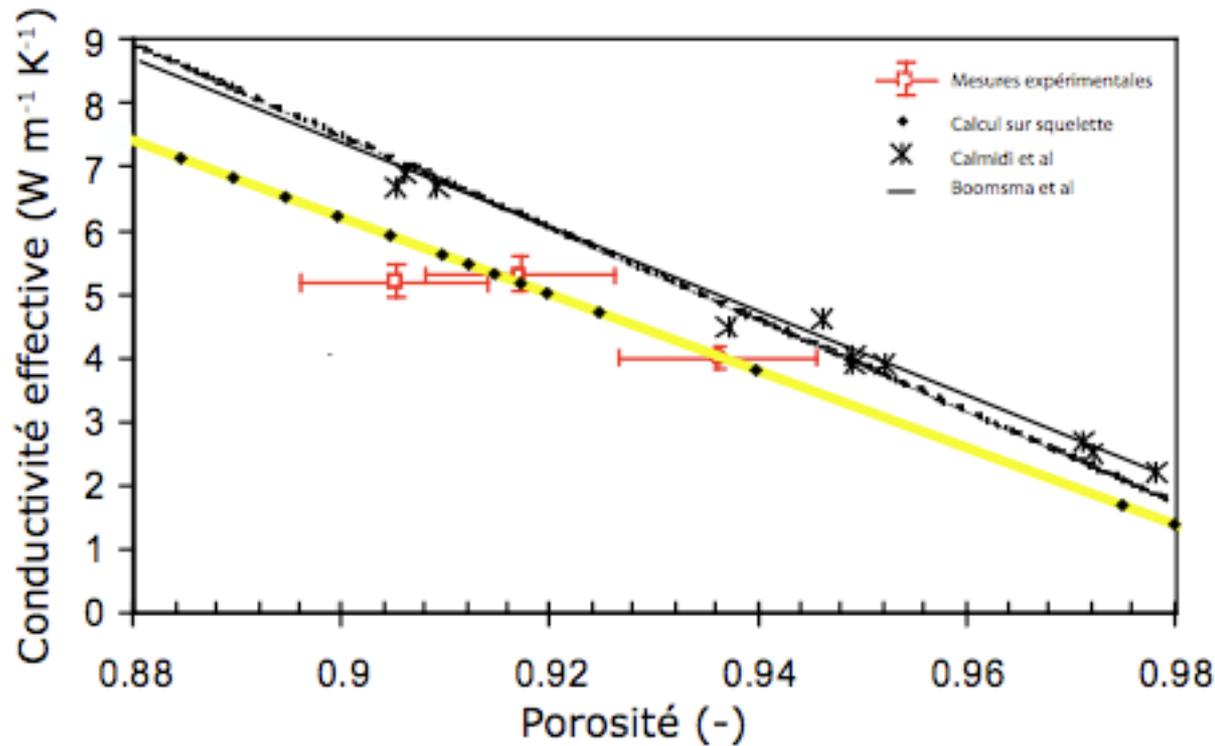


Influence of Nusselt Number



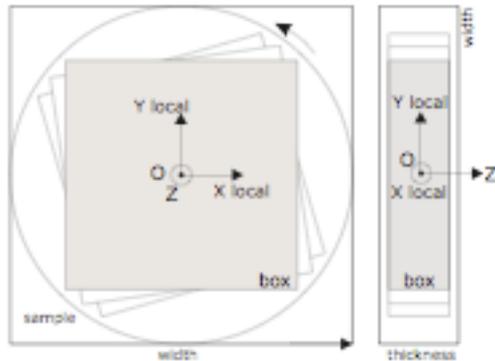
Influence of fluid conductivity

Impact de la porosité



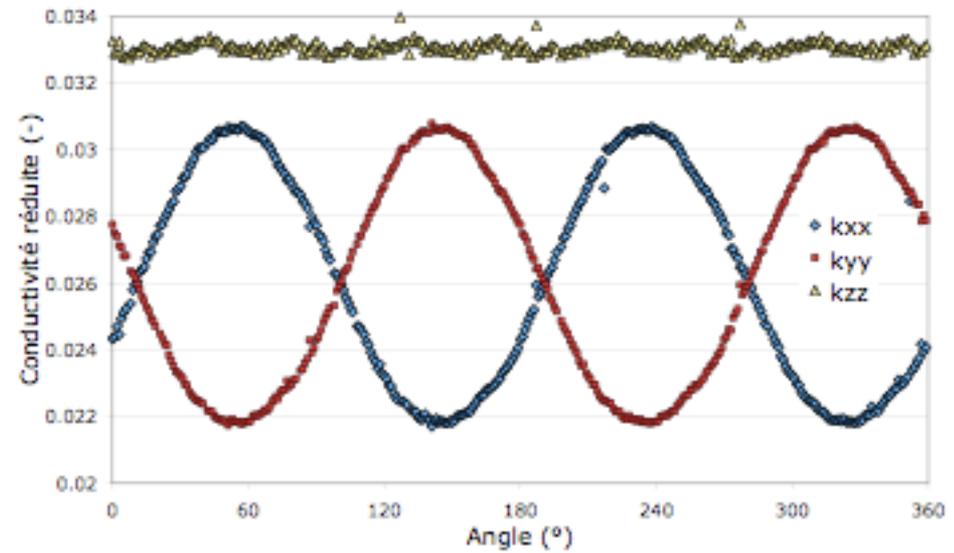
- La conductivité thermique dépend de la porosité
- En donnant artificiellement la porosité du squelette AL20 on obtient la conductivité de l'AL10 ⇒ Pas d'influence de la taille de pore

Conductivité directionnelle



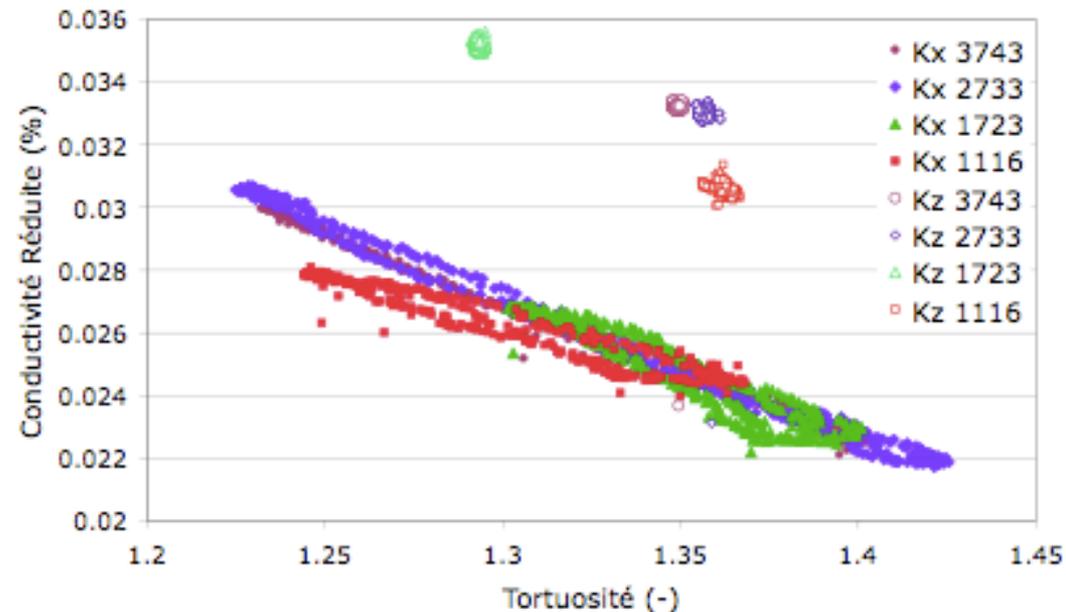
Mesure de la conductivité dans des parallélépipèdes extraits pour une révolution de l'échantillon

- Pas de variations suivant z
- Variations sinusoïdales en opposition de phase pour x et y



Impact de la tortuosité

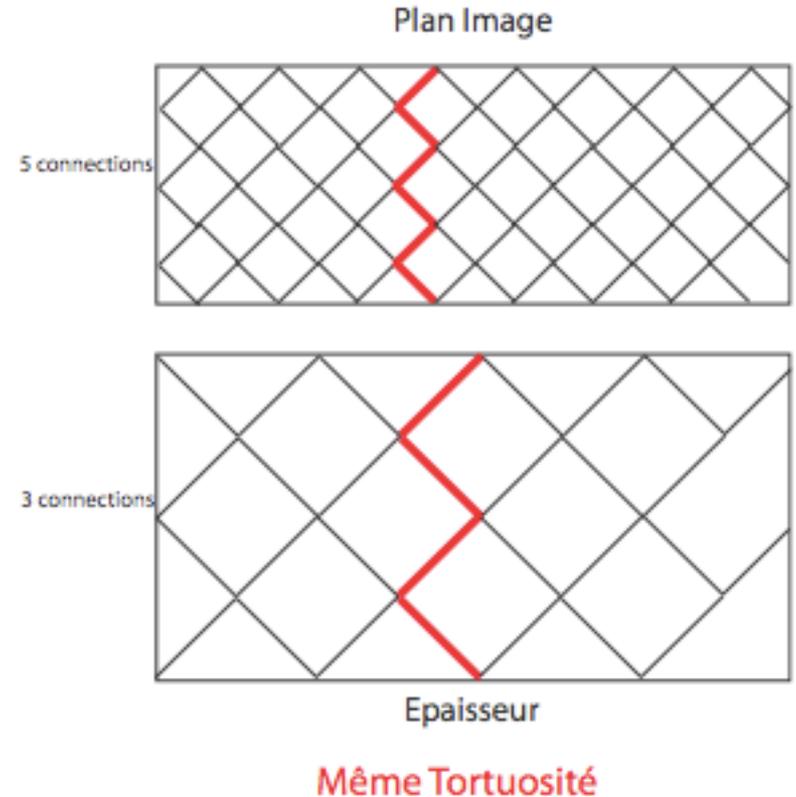
- Calcul tortuosité pour la révolution
- Dépendance linéaire entre tortuosité et conductivité thermique
- Même comportement pour toutes les mousses
- Pour une tortuosité donnée la conductivité est différente selon l'épaisseur



Conductivité thermique en fonction de la tortuosité

Influence de l'organisation des cellules

- Dans l'épaisseur le nombre de connections n'est pas le même que dans le plan image
- L'allongement et l'organisation des cellules expliquent ce phénomène
- À chaque connection le flux de chaleur se répartit entre les branches



Plus de connections --> plus de brins à même porosité

La section des brins est plus faible pour le réseau présentant le plus fort nombre de connections /m

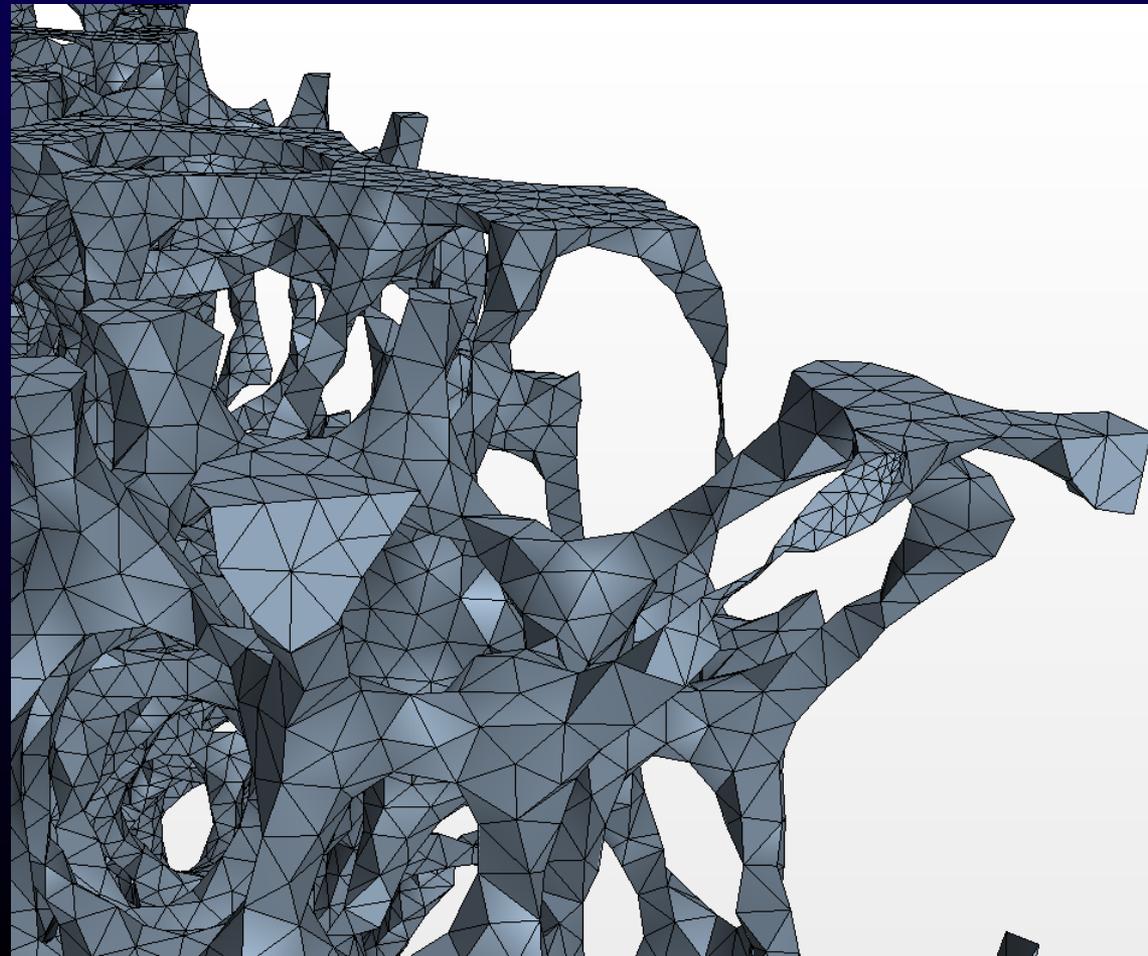
Simulation numérique directe

- 3 mousses ERG 10, 20, 40 PPI échantillons 50 x 50 x 100 mm
- taille de pores 4,5 – 3,5 – 2,4 mm, brins 366 – 232 – 188 μm
- Discretisation géométrique
 - Résolution d'image de 75 μ à 250 μm
- Domaines de calcul
 - maillage sur image sous résolue ou entière
 - Domaine Cubique de 10 mm à 45 mm
 - Pavés 22x8x8 mm, 22x10x10
- Problème de taille de maillage et temps de calcul
 - Erreur géométrique et forme des objets
 - Objectif
maillage à moins de 10 million de cellules au maximum
et 150 000 cellules pour les plus petits cubes

Premier maillage

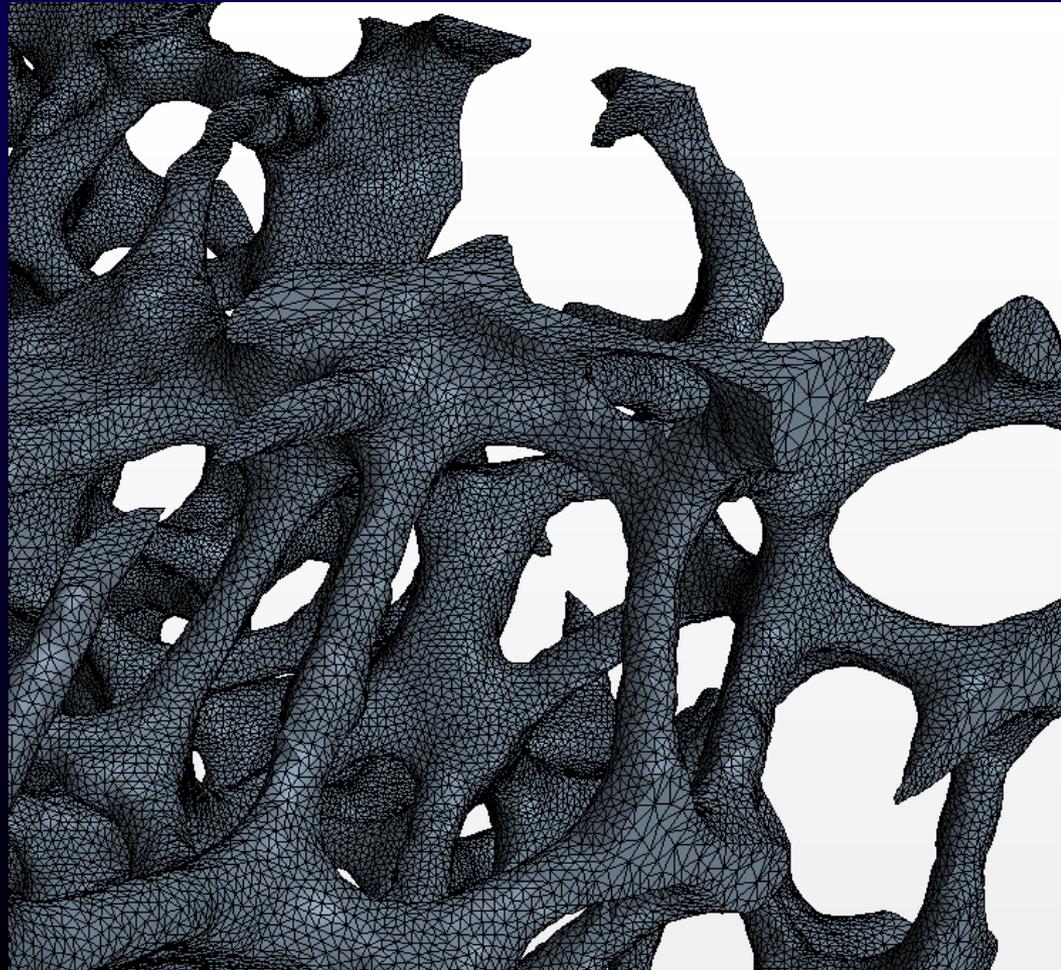
- 45 mm arête
- résolution initiale d'image 150 μm
- Taille de maille 700 μm → 2 500 000 cellules

- 'erreurs géométriques
- Brins coupés
- Perte de matière
up to 5 %
- Perte de forme

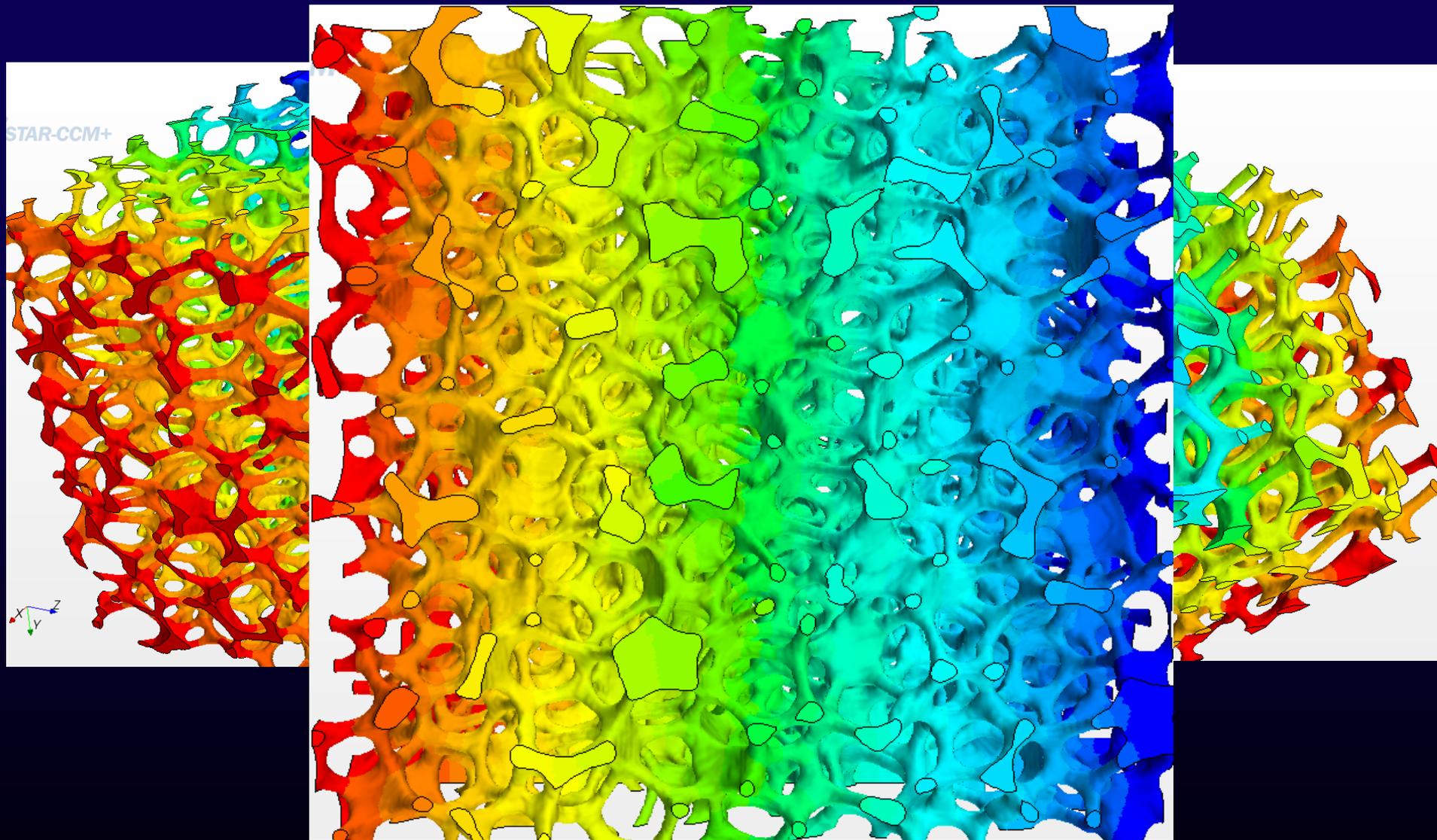


Un « Bon » maillage ;-)

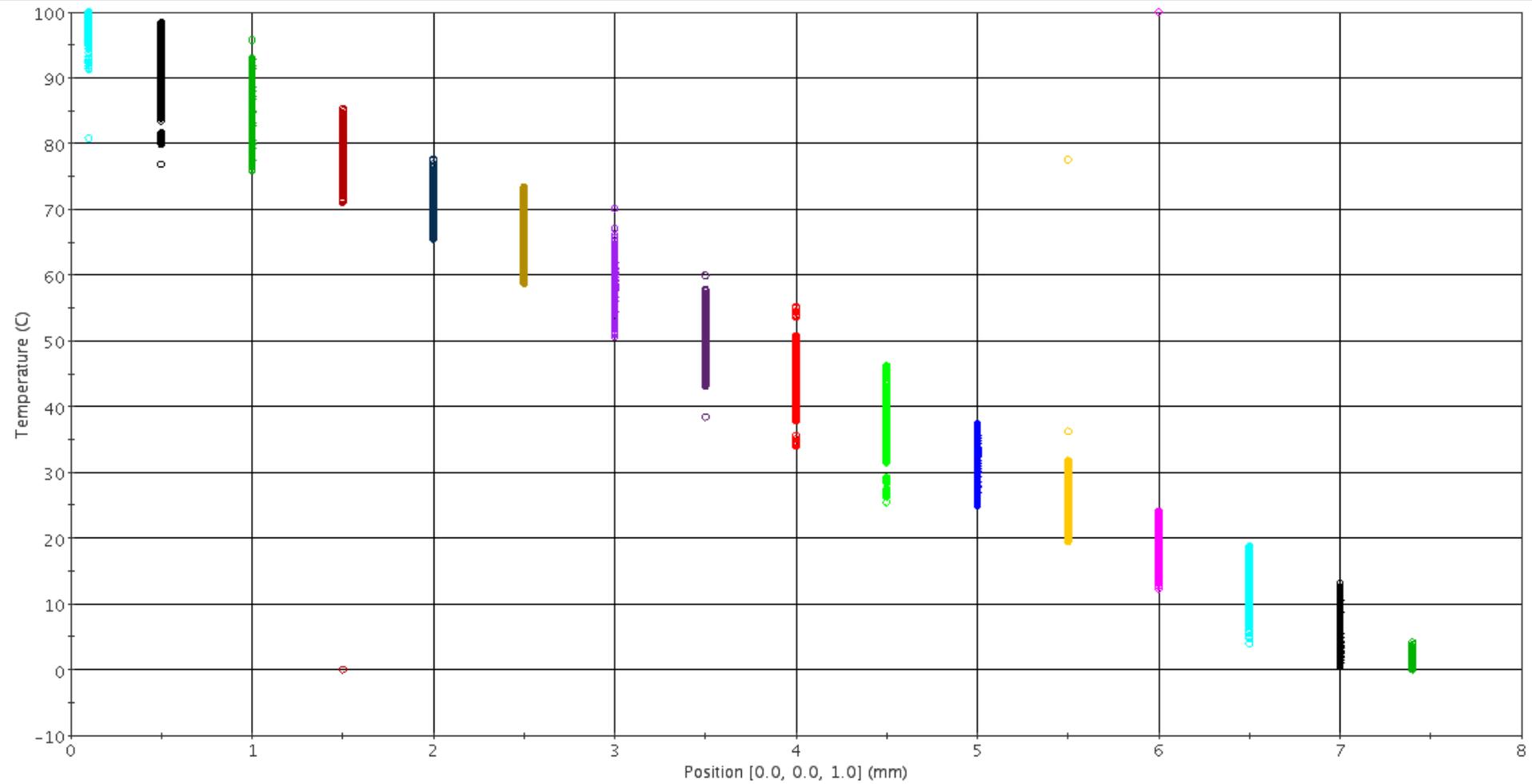
- 15 mm arête
- résolution initiale d'image 75 μm
- Taille de maille 175 μm → 10 000 000 cellules
- Pas de perte d'infos
- Le compromis :
- Maillage à 350 μm
 - Permet de travailler sur différentes tailles de bocs
 - Discrétisation satisfaisante solution identique au cas + fin



Champs de température



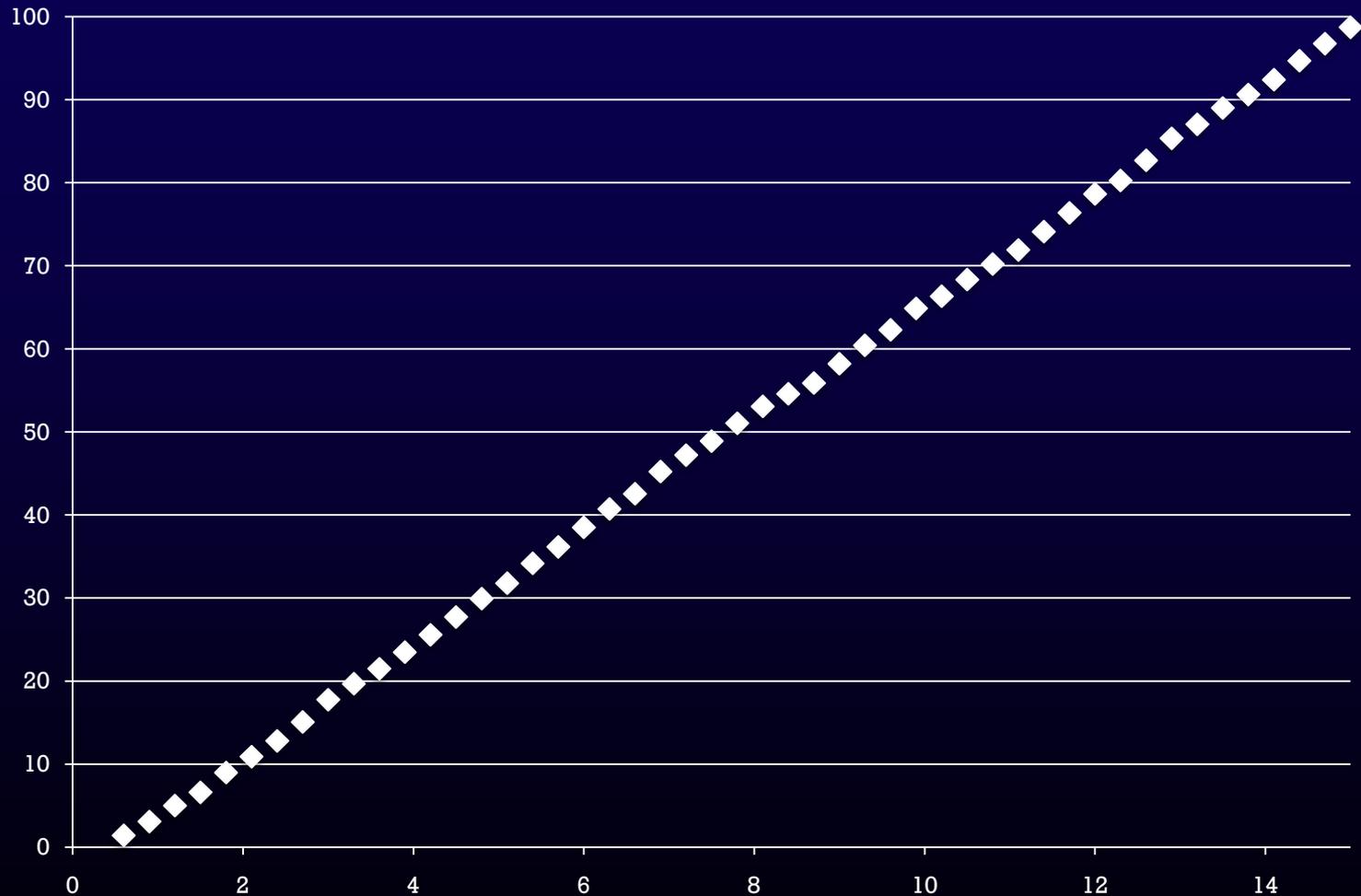
Profil de température



20 plans de coupes sur 8 mm – ERG 20 PPI

Profil de température moyennées

- 50 plans de coupes



Résultats conductivité « macro »

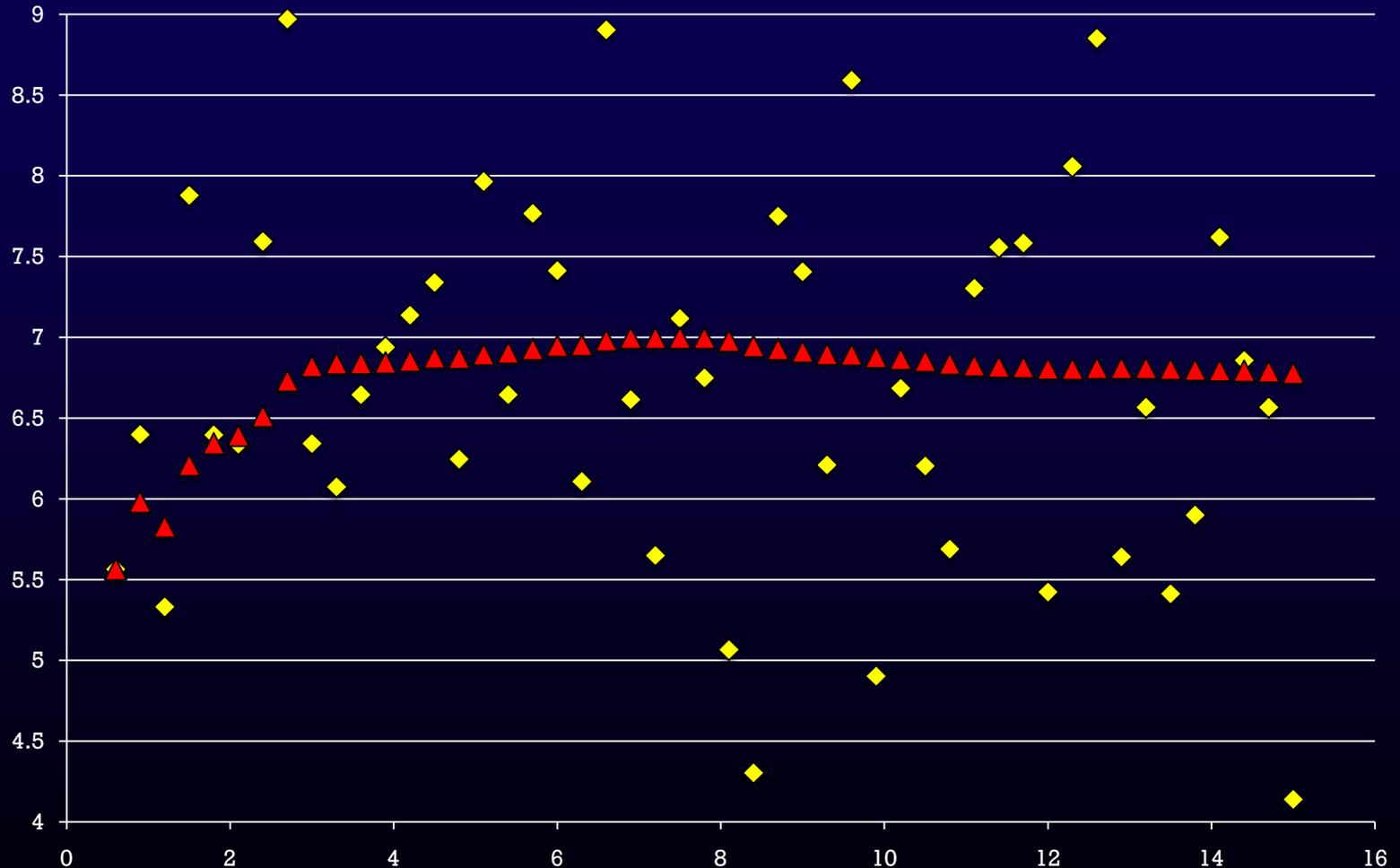
- Calculs sur blocs de 20 mm environ
- Mousse légèrement anisotrope
- Direction principales des cellules proches des axes XYZ
- Extraction des conductivités apparentes dans 3 directions
- Résultats sur les termes diagonaux uniquement

Conductivite (W/mK)	10	20	40
X	10.44	6.49	9.06
Y	10.19	8.3	8.04
Z	13.36	10.96	10.06
porosite (%)	87.96	90.41	89.78

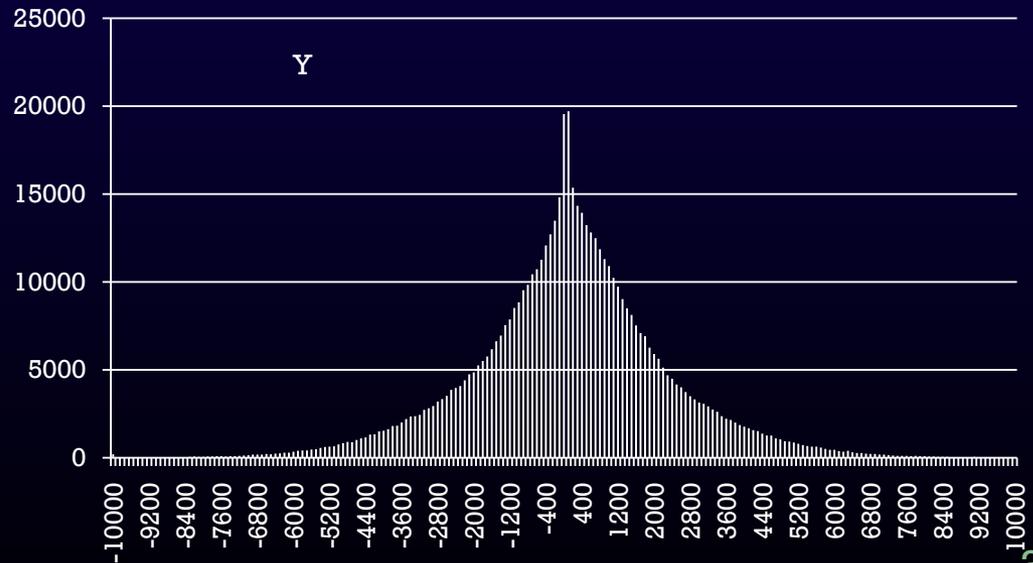
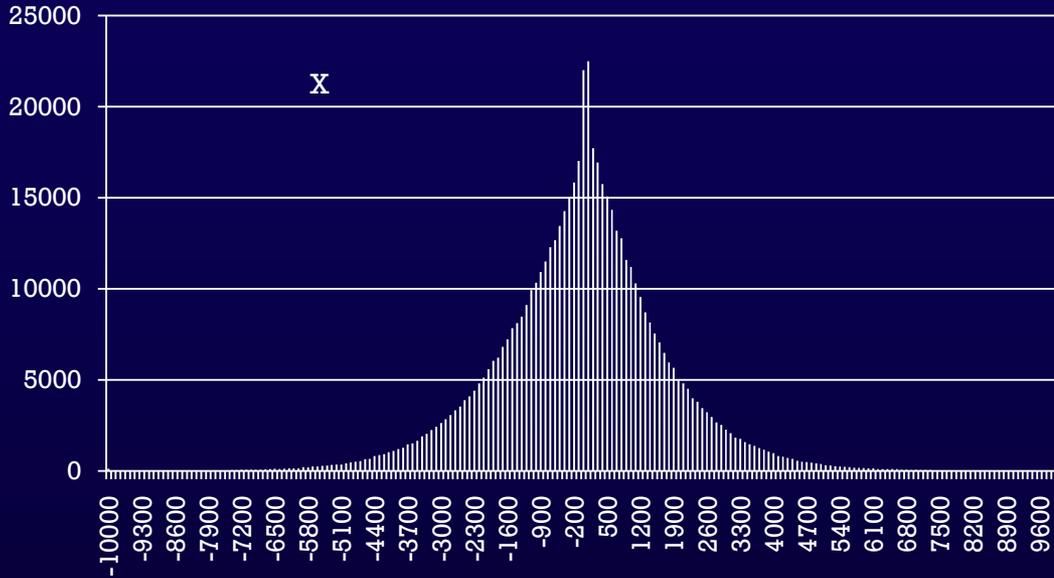
Gradient de temperature

Moyenne sur un plan de coupe

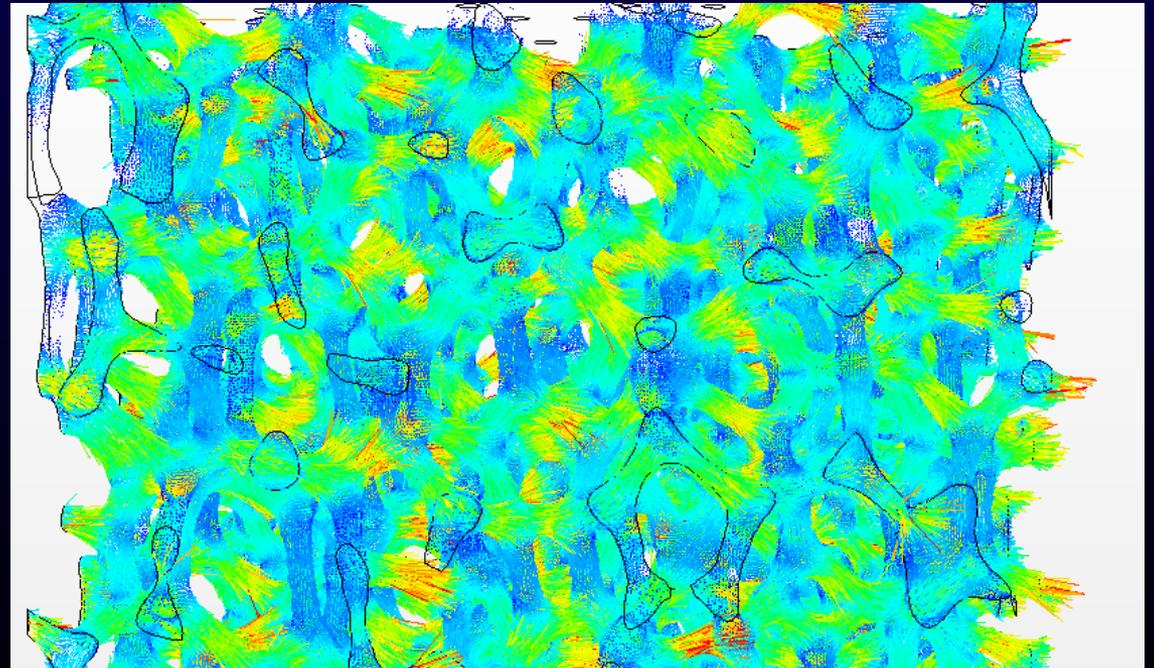
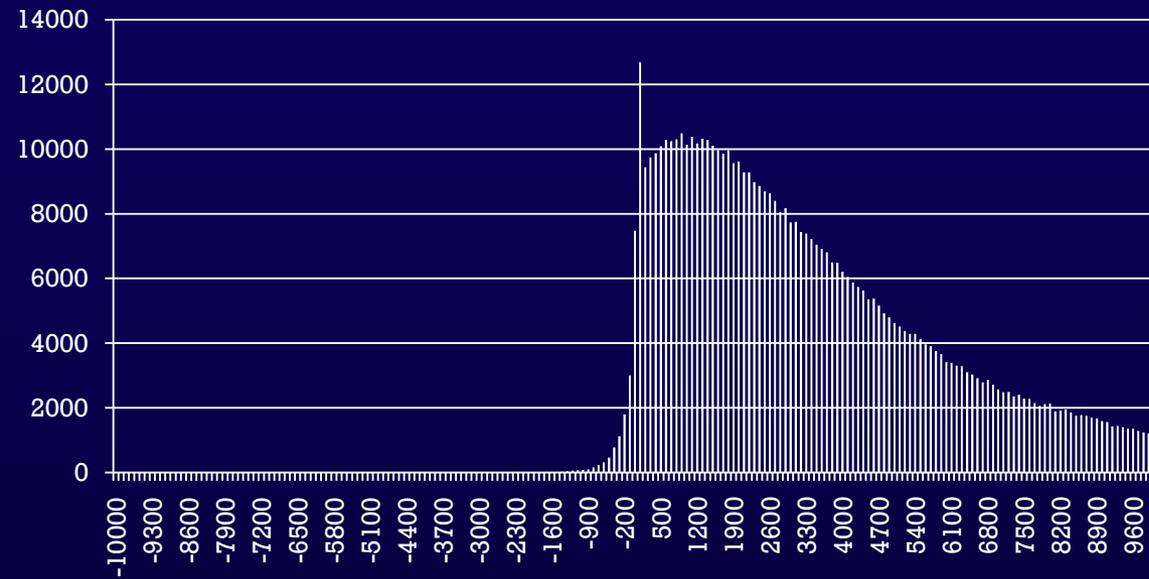
Derivée point à point et interpolation sur une longueur croissante



Gradients transverses



Gradient principal



Conclusions

Méthode de mesures mise en place

Calculs sur réseaux opérationnels

Premiers résultats de simulation directe

Possibilité de travailler sur les approches statistiques

En cours :

appliquer la démarche au tenseur de conductivité