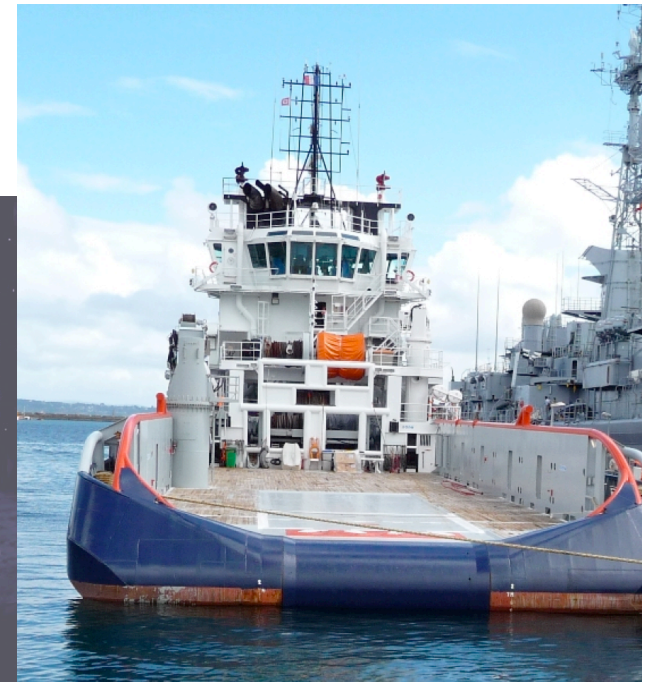
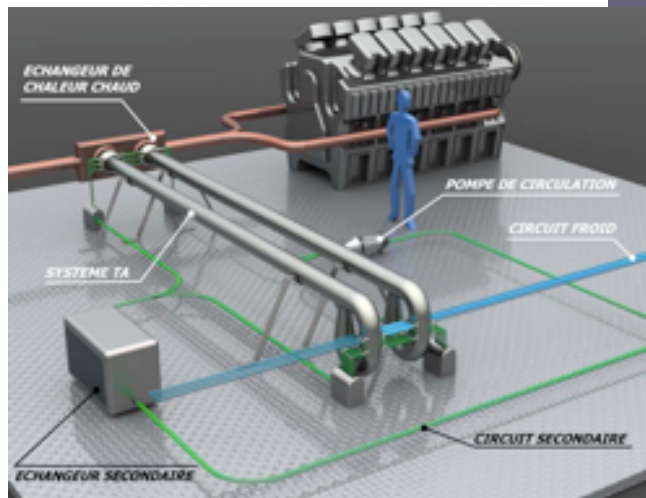


# Journée SFT

## Machines thermoacoustiques : contribution au développement durable

### **MERITA**

#### MER INNOVATION THERMO-ACOUSTIQUE



# MERITA

**Constat : Secteur Naval**

**production de froid (10 -50%) conso énergétique**

**PB gaz effet de serre (interdiction 2012)**

**Reliquefaction GN impact économique et stratégique fort**

**Effluents thermiques disponibles (échappement)**

**Objectif :**

**réduction importante de la consommation d'énergie pour la production de froid dans les navires, grâce à un réfrigérateur thermoacoustique utilisant des rejets thermiques**

# Objectifs (II)

**Conception et la fabrication d'un démonstrateur Intégration et test à bord.**

**Valider le facteur d'échelle / puissances élevées ,**

**Valider l'intégration système**

**Modélisation des transferts écoulement/thermique/acoustique**

**Design du générateur d'onde**

**Design et développement des échangeurs spécifiques :**

**Captation effluents thermique (fumées...)**

**Rejet eau douce/eau de mer**

**Echangeurs cryogéniques**

**« Stack » adaptés aux densités de puissance**

**Caloporteurs (mono, diphasiques)**

# Historique

Projet Soutenu par le FUI (Appel Nov. 2009)

Lancement : 8 avril 2010

**LESTERGLAS**

**EMM DCNS**

**IUSTI Ecole centrale Nantes LATEP Ecole Navale**

**HEATRIC PAUMIER PIRIOU BOURBON GdF\_Suez**

**Démission du porteur** (LESTERGLAS) : 12 Octobre 2010

Réorganisation du Consortium en cours :

**EMM DCNS**

**IUSTI Ecole centrale Nantes LATEP Ecole Navale**

**Heatric PAUMIER Piriou BOURBON GdF\_Suez**

**Appel à Manifestation d'Intérêt : Acousticien/Design système TA**



# IUSTI

[iusti.polytech.univ-mrs.fr](http://iusti.polytech.univ-mrs.fr)

INSTITUT UNIVERSITAIRE DES SYSTEMES THERMIQUES INDUSTRIELS



IUSTI U.M.R. 6595



## Laboratoire IUSTI D<sup>pt</sup> Mécanique Energétique Ecole Polytech'Marseille

**150 personnes**

55 Enseignants chercheurs

15 Chercheurs CNRS

Personnels techniques & administratifs

50 Thésards & postdocs

Quatres axes principaux :

**Physique des transferts,**

**Ecoulements grandes vitesses,**

**Combustion et risques,**

**Milieus divisés et fluides complexes**

Deux axes transverses :

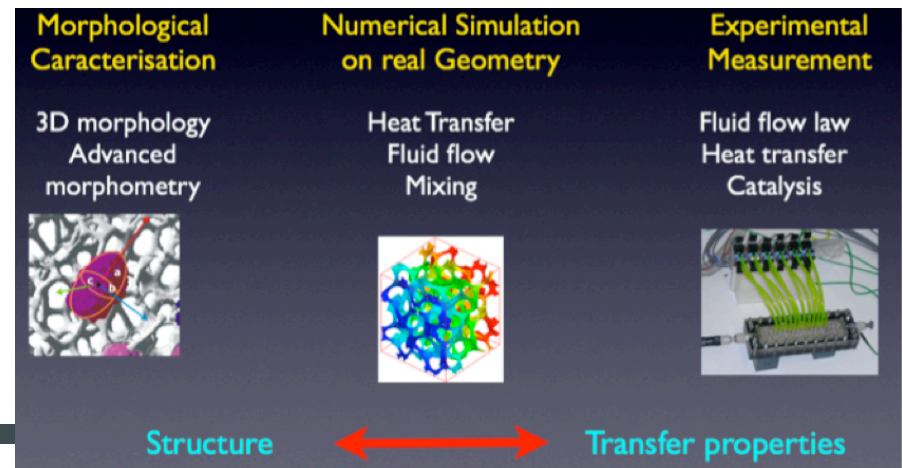
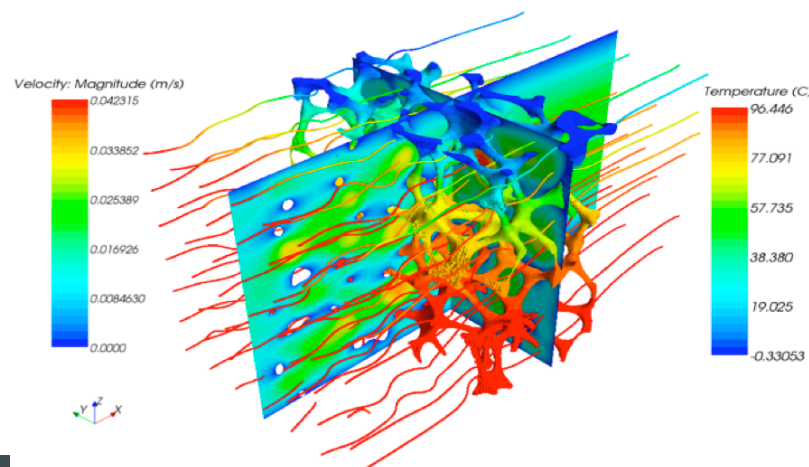
**diagnostics optiques et biomécanique**

L'IUSTI membre des pôles: Cap Energie et mer PACA

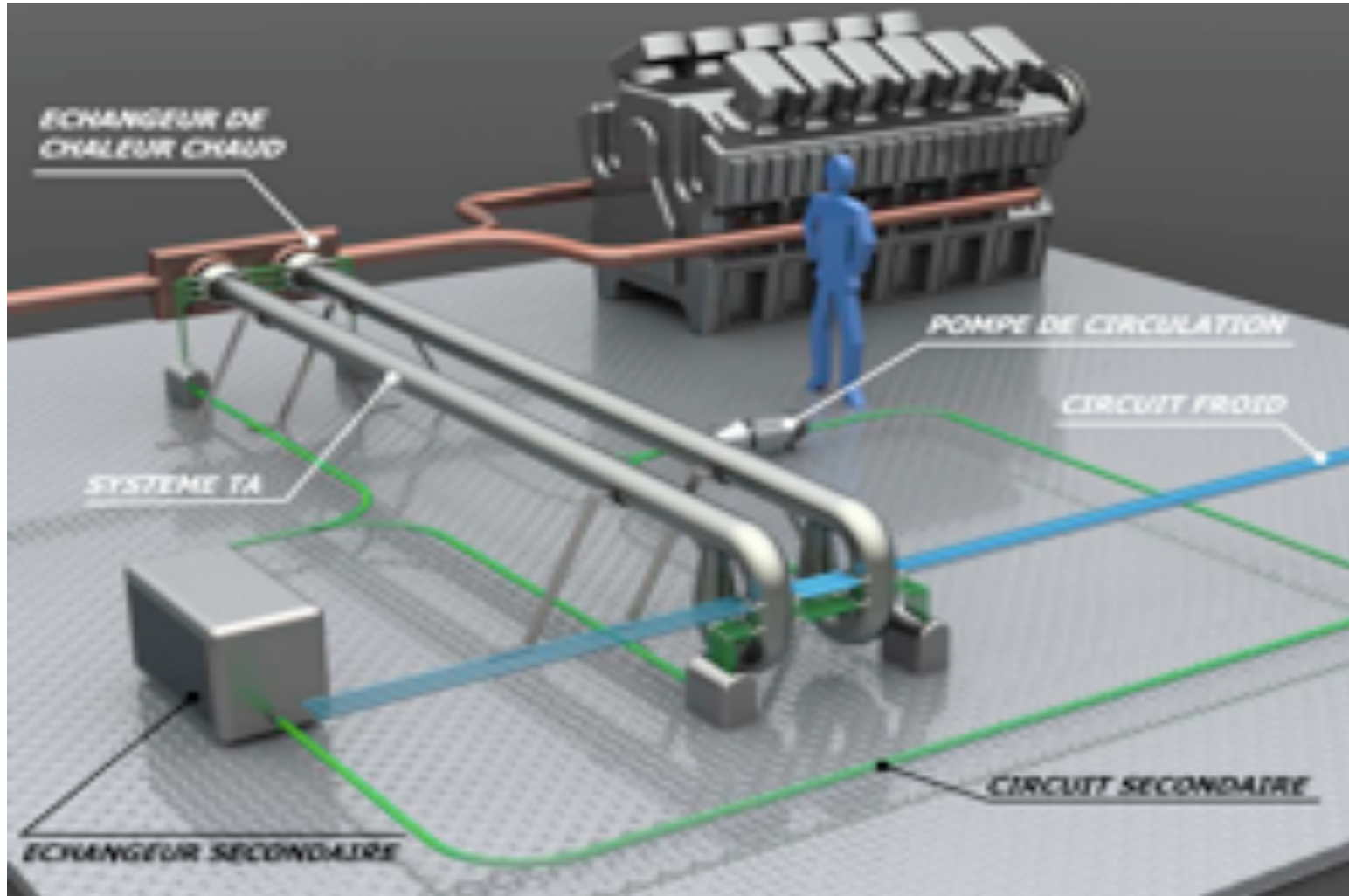
# Milieux Hétérogènes et Transfert

Thermique des Matériaux & Matériaux pour la Thermique

- *Caractérisation des propriétés thermophysiques et d'échange de matériaux poreux. Mise en place de bancs de mesures appropriés et création de bases de données de propriétés*
- *Elaboration d'outils de calcul numérique permettant de simuler les phénomènes de transferts dans le cadre de diverses hypothèses relatives aux lois de fermeture.*
- *Impact de la morphologie des matrices poreuses sur les propriétés de transport.*



# Echangeurs impliqués



# Contribution au Projet

**Thèse : Modélisation d'échangeurs : Approche milieu poreux et optimisation structurale appliquée au couplage Thermo-Acoustique**

**Prise en compte de l'environnement thermique dans la modélisation et le design du système**

**Maîtrise des champs locaux de température**

**Détermination de propriétés effectives (lois d'écoulement, propriétés de transferts) sur la base de géométries réelles & idéalisées**

**Developpement de matrices solides optimisées pour l'application (ecoulement gaz-particule & module TA)**



# Le matériau mousse

**Nombreuses applications de la mousse dans le domaine des transferts**

- milieu suffisamment modèle pour comprendre les phénomènes de transport

Structure cellulaire ouverte

Fibreuse

Quasi périodique

Très ouverte (duale d'un empilement de bille)

Modulable/contrôlable

Taille des pores

Épaisseur des brins

Rugosité et la forme des brins (dépôt de surface)



Bon candidat pour un milieu modèle d'étude  
des transferts

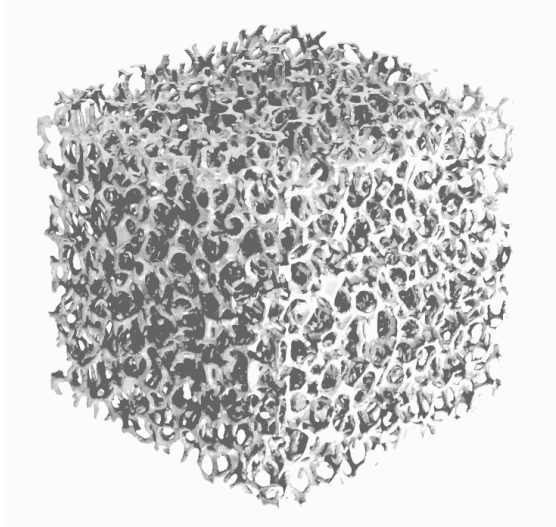
et très intéressant du point vue applicatif

**Impact fort sur les transferts**

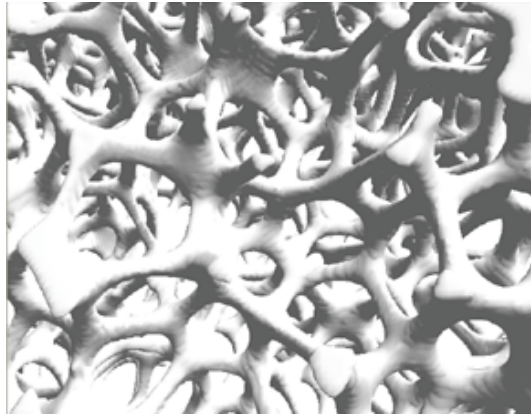
- **Caractérisation morphologique insuffisante**
- **Peu de données et forte dispersion (écoulement, conductivité, échange de chaleur...)**
- **Pas d'études en diphasique**

# Quelques exemples de mousses

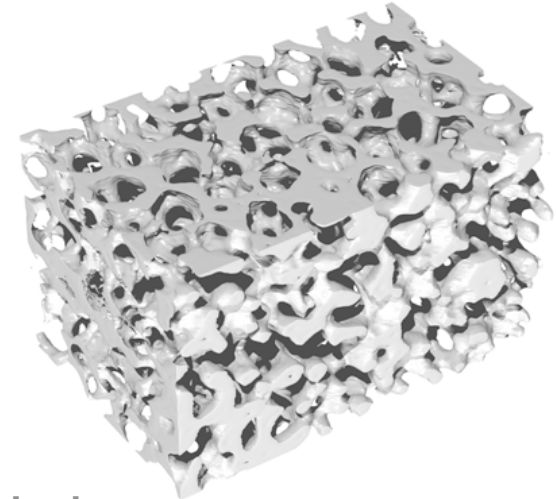
NiCr foams – Recemat  
(10,20,30,40,50,100 ppi)



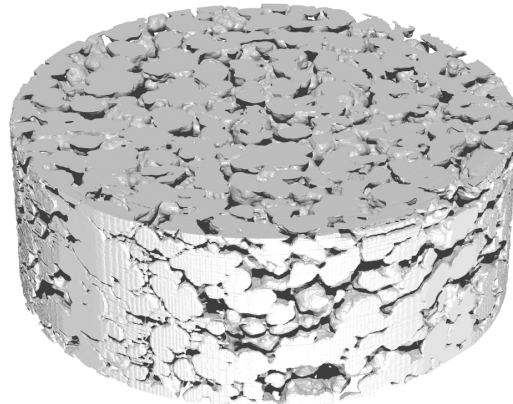
Al foams – ERG (5,10,20 ppi)



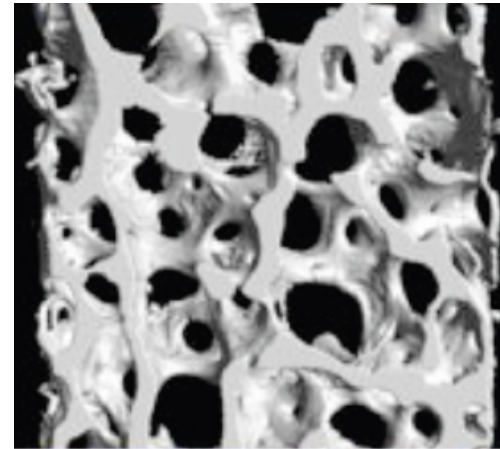
CTIF Stochastic foam



Sintered Polyethylene - Porvair



Trabecular bone



# Applications

Echangeur de chaleur (mono et diphasique), Heat sink

Mèche capillaire (CPL, spatial...)

Support catalytique (génie chimique, rétention de polluants)

Stabilisateur de flamme (combustion propre)

Systèmes « hydrogène » (réformeur, purificateur, PAC...)

Isolants

Support mécanique, rigidificateur

Absorbeur de vibrations, de chocs, acoustique

Transferts fortes densité de puissance ( $>100\text{W}/\text{cm}^2$ ) (diphasique pompé)

matériau intégrable avec des caloducs, Pompes thermo capillaires, Spreader

Mélangeur

.....

# Potentiel des mousses

**Matériau optimal en rien**

**Mais Excellent en tout ...**

**Aucun autre matériau ne possède un jeu de propriétés intéressantes pour l'ensemble des aspects thermiques mécanique....**

**Idéal pour un rôle multifonctionnel :**

**échangeur-réacteurs, mécanique-transferts.....**

# Utilisation des mousses

**3 points clefs :**

**Fabrication avec un faible coût industriel**

**Caractérisation des propriétés :**

**géométriques, d'écoulement,  
Acoustique, Thermique,  
De mélange, catalytiques....**

**Relation structure <-> propriété pour  
dimensionner les applications**

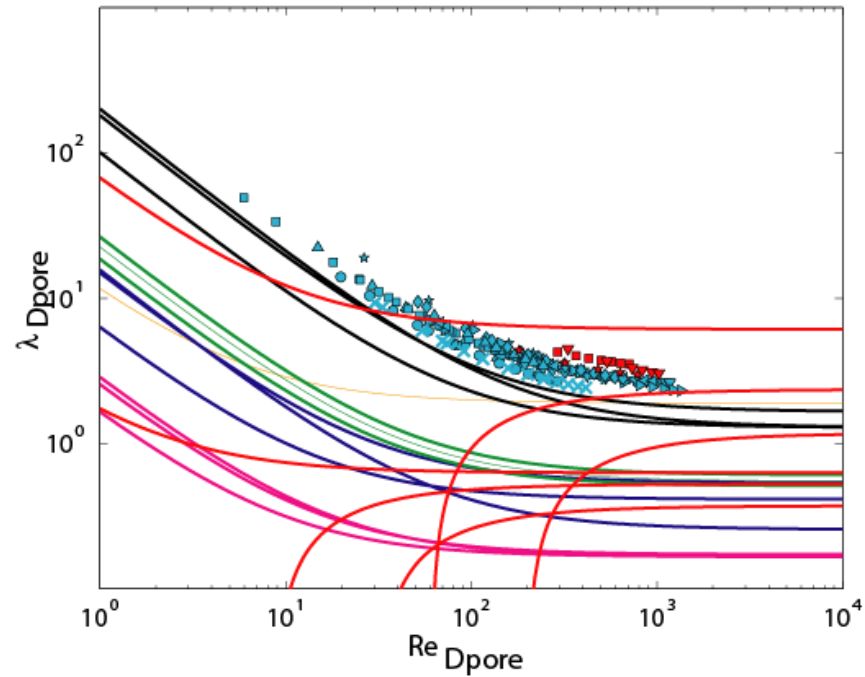
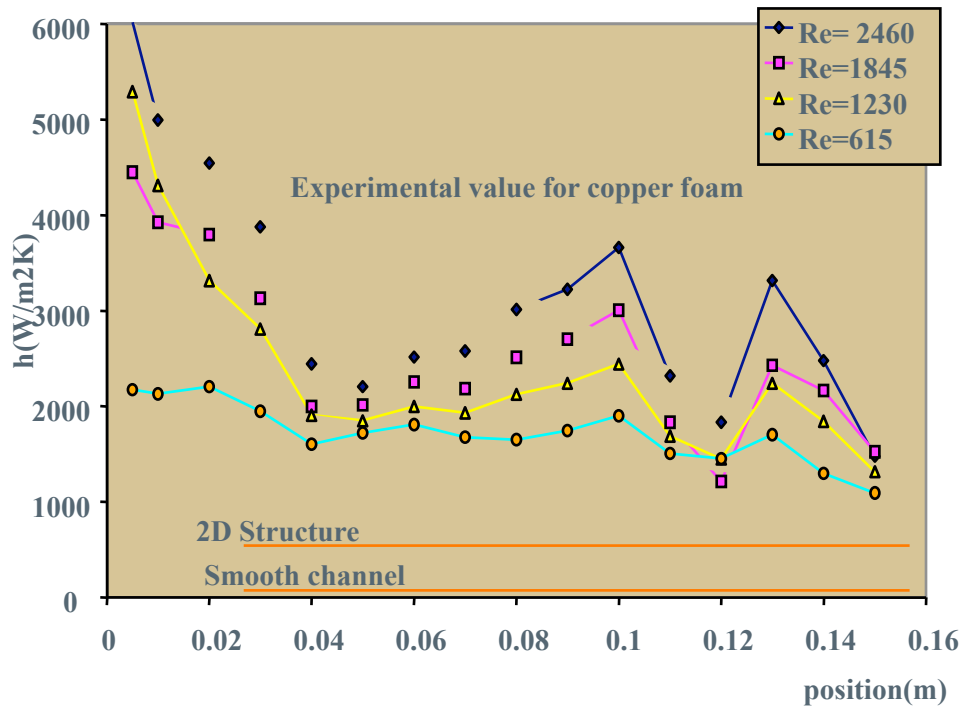
# Problématique

Super-isolant ← **Mousses** → super-conducteur

5% Volume de solide -->

2 ordres de grandeurs sur les transferts de chaleur

Pour des structures apparaments identiques :  
Dispersion des résultats  
tendances npn-physiques



# Echanges thermiques entre phases

$$(1-\varepsilon)\rho_s C_{p_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (-\lambda_s^* \vec{\nabla} T_s) + h(T_s - T_F)$$

$$\varepsilon\rho_F C_{p_F} \frac{\partial T_F}{\partial t} = -\vec{\nabla} \cdot (-\lambda_f^* \vec{\nabla} T_F) - \eta_F C_{p_F} \vec{\nabla} T_F + h(T_F - T_s)$$

- Modèle 2 températures :

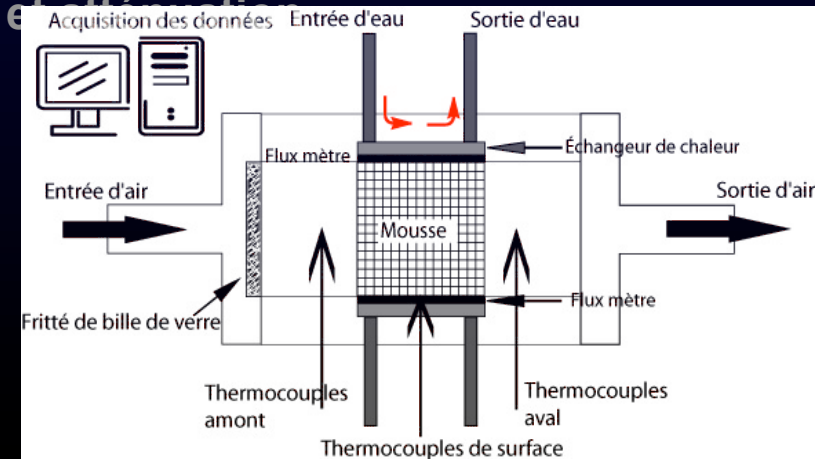
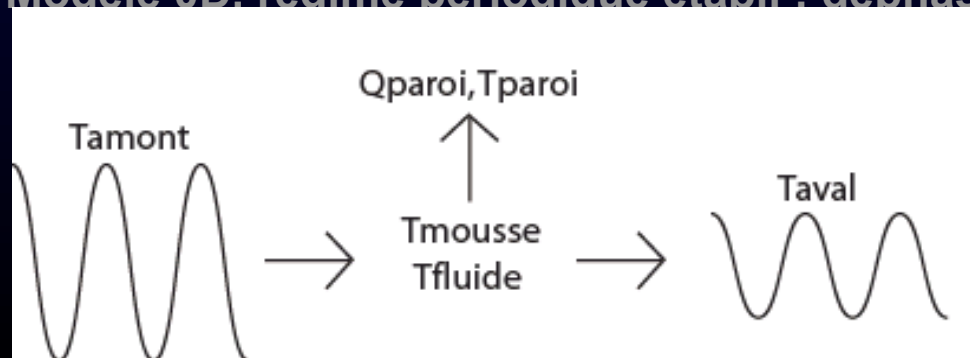
- Nécessite connaissance de :
  - coefficient d'échange entre phases
  - dispersion

## Mesure du h brin-fluide (h volumique)

Difficulté : flux échangé et température des phases

→ Mesurer température fluide amont-Aval d'un échantillon.

Modèle 0D, régime périodique établi : déphasage et atténuation



# Modèle 0D : fluide et mousse

- Régime périodique établi
- Température de mousse uniforme dans l'espace
- Echanges entre phases « convectifs »

Bilans thermique sur chaque phase

$$(1-\varepsilon)(\rho C_p)_s \frac{dT_s}{dt} = h_{sf} S_p (T_f - T_s)$$

$$\dot{m} C_{p_f} (T_{aval} - T_{amont}) = V h_{sf} S_p (T_s - T_f) + Q_p$$

Mesure du flux pariétal

$$T_{aval}^{\sim} = \frac{T_{amont3}}{\left( h_{vol}^2 + (\rho_s C_{p_s} (\varepsilon - 1) \omega)^2 \right) \dot{m} C_{p_{fluide}}}$$

$$\left( h_{vol}^2 \rho_s C_{p_s} (\varepsilon - 1) V \omega \cos(\omega t) + \left( h_{vol}^2 \dot{m} C_{p_{fluide}} + (\rho_s C_{p_s} (\varepsilon - 1) \omega)^2 \left( \dot{m} C_{p_{fluide}} + h_{vol} V \right) \right) \sin(\omega t) \right)$$

## ○ Mesures

$$T_{amont} = T_{amont1} + T_{amont3} \sin(\omega t)$$

$$T_{aval} = T_{aval1} + T_{aval2} \cos(\omega t) + T_{aval3} \sin(\omega t)$$

$$T_p = T_{p1} + T_{p2} \cos(\omega t) + T_{p3} \sin(\omega t)$$

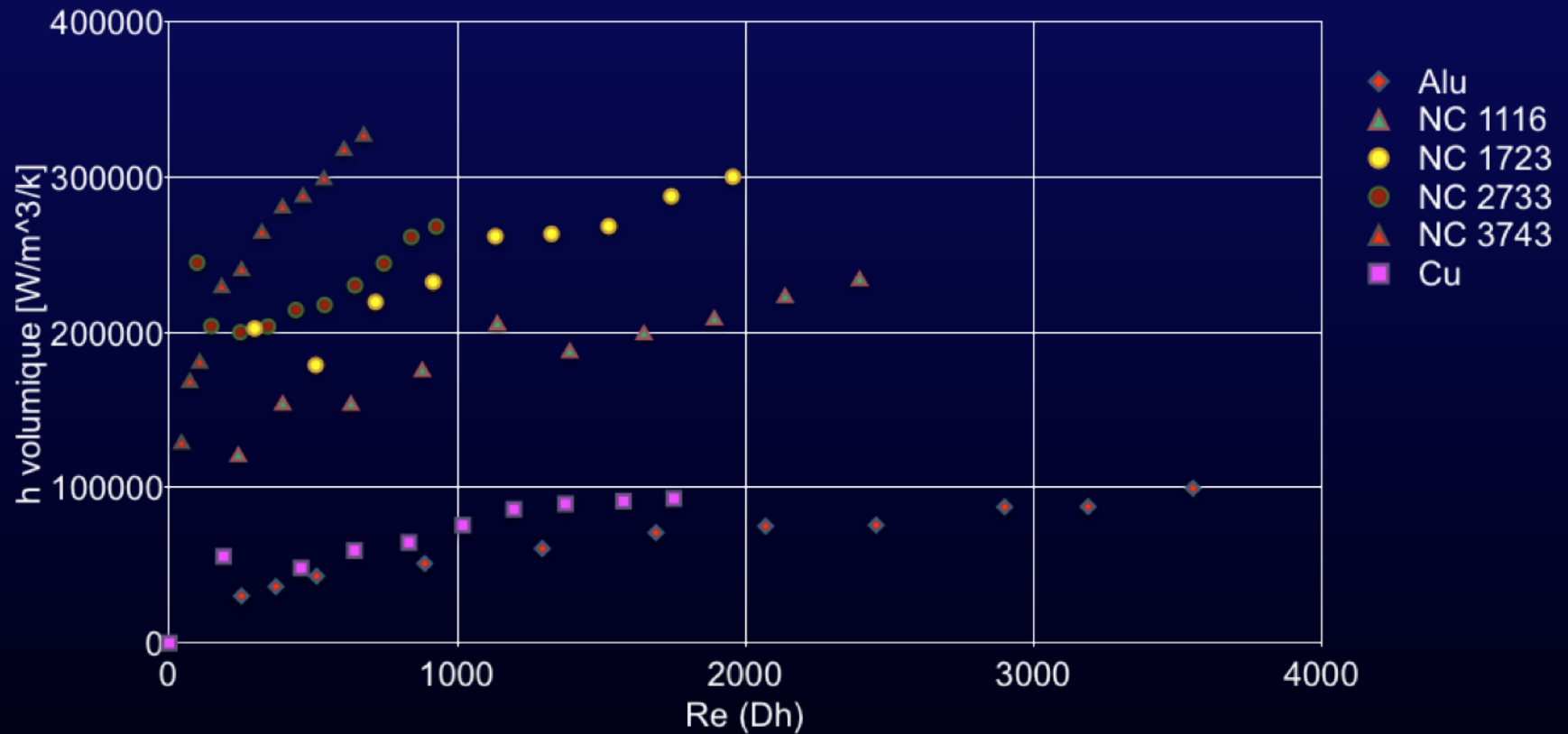
$$Q_p = Q_{p1} + Q_{p2} \cos(\omega t) + Q_{p3} \sin(\omega t)$$

## ○ Identification

$$h = \frac{(\rho C_p (1-\varepsilon) \omega) T_{aval3}}{T_{amont2} - T_{amont2}}$$



# Coefficient d'échange volumique en fonction du nombre de Reynolds

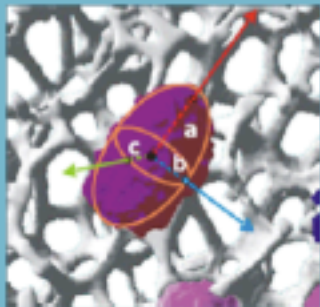


○ Corrélation à la morphologie

# Méthodologie

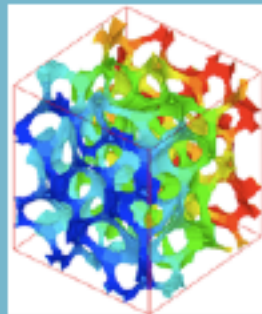
## Morphological Characterisation

- 3D morphology
- Advanced morphometry



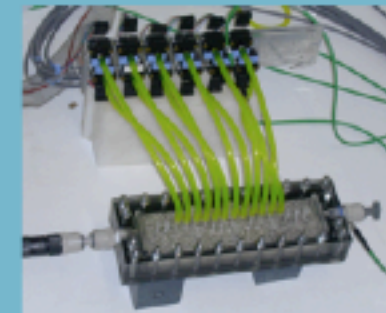
## Numerical Simulation on real Geometry

- Heat Transfer
- Fluid flow
- Mixing



## Experimental Measurement

- Fluid flow law
- Heat transfer
- Catalysis



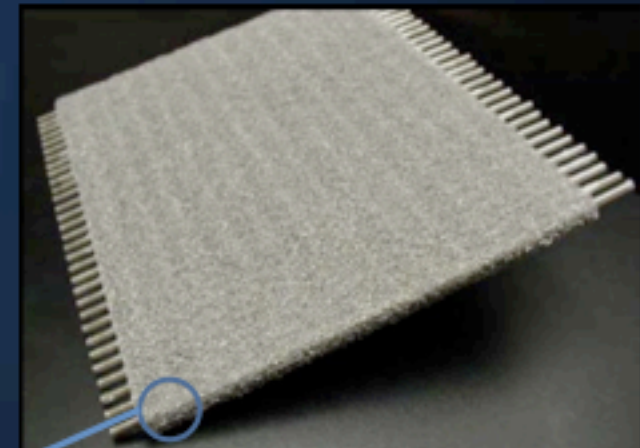
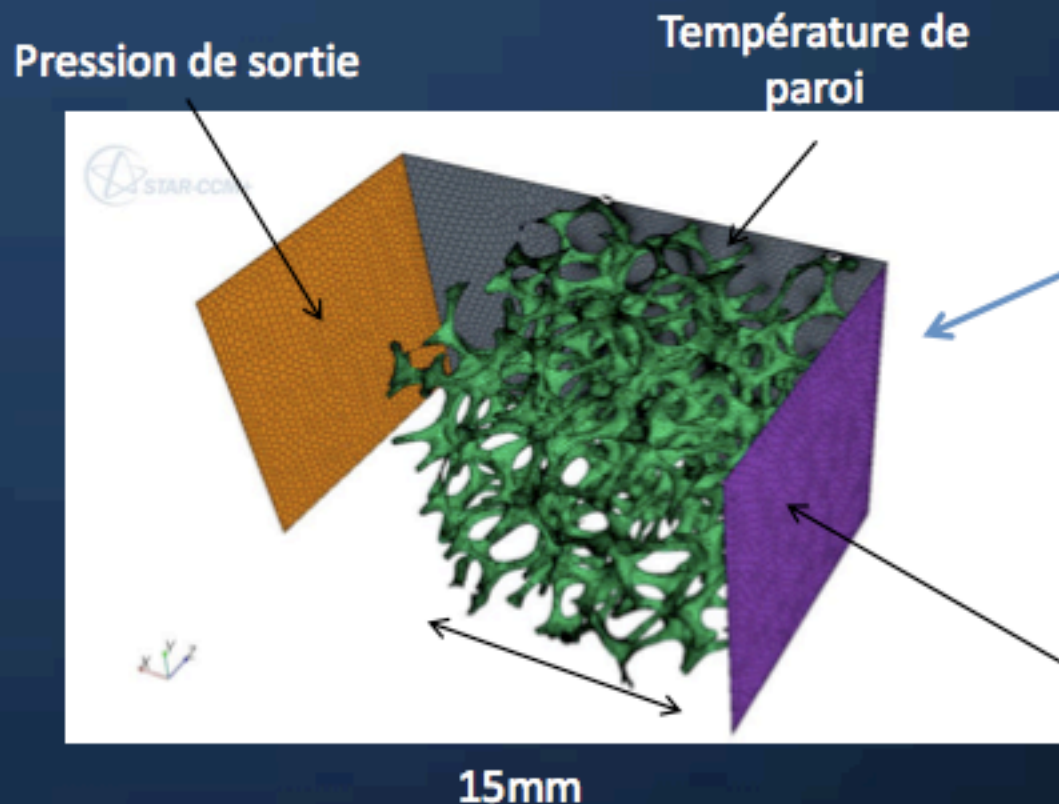
Structure



Transfer properties

# Volume représentatif d'un échangeur de chaleur

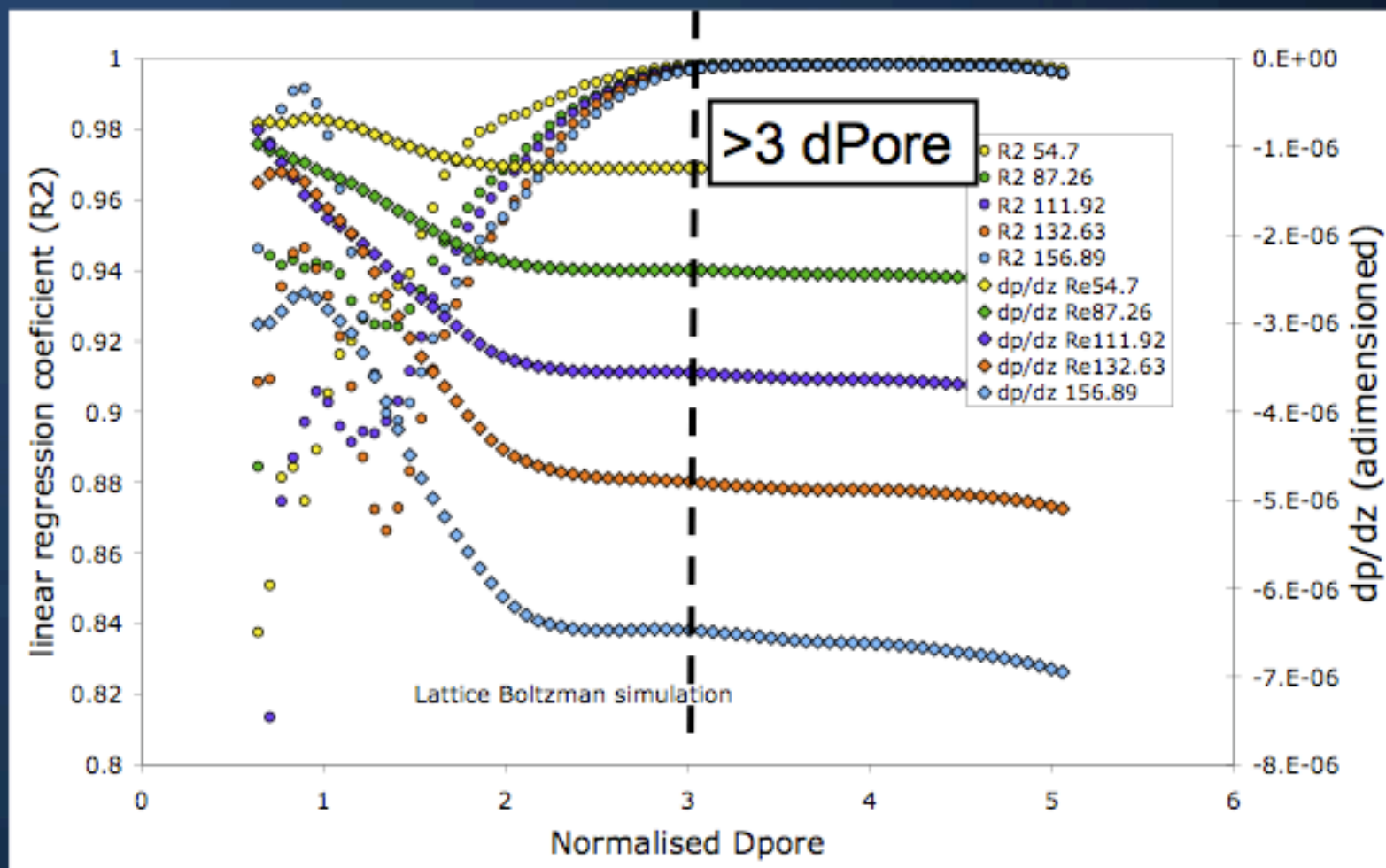
Simulation sur StarCCM+ de CD- Adapco



- Taille de VER
- Etablissement de l'écoulement
- Couche Limite thermique "brisée"
- Mélange des filets fluide
- → Augmentation des transferts

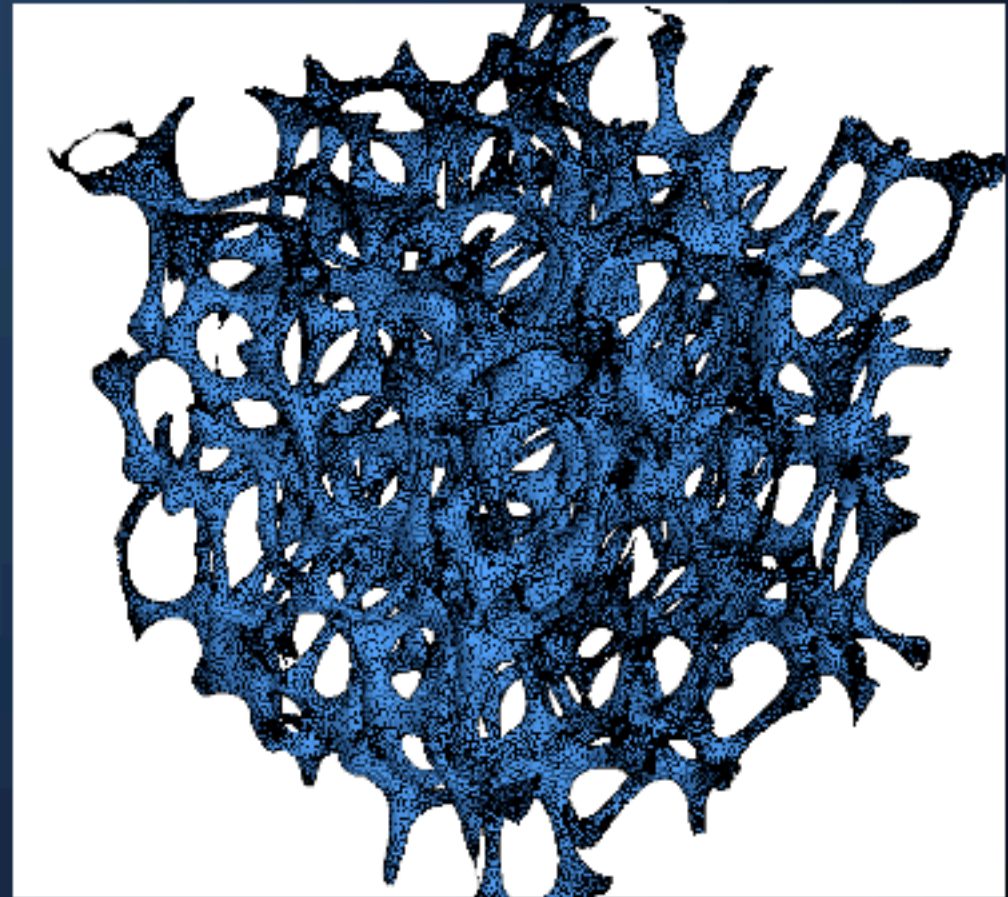
Pression d'entrée  
ou débit massique

# Evaluation du VER pour la pression



# Propriétés du maillage

- Polyhedral volume mesh
- Thin prism mesh in boundary layer
- Target size : 0.2mm
- Minimal Size : 0.02mm
- 1.200.000 volumes cells (solid+fluid)



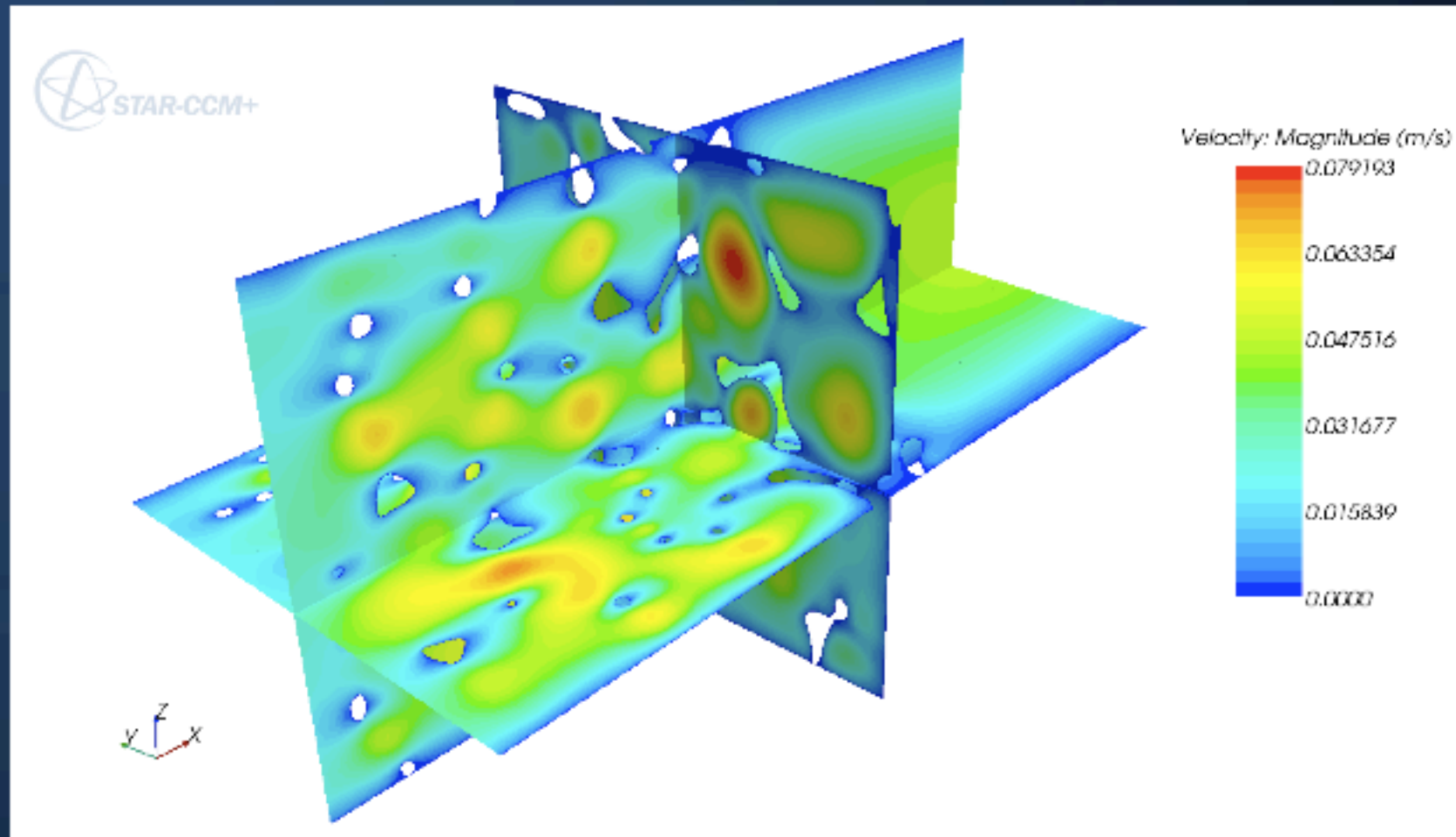
Représentation de la phase solide maillée

# Modèles physiques

- Finite volume method
- Navier-Stokes and Energy balance.
- Steady, Laminar, incompressible.
- 5 hours on 1 Intel QuadriCore @ 3GHz

- Fluid properties:
  - $\lambda=0.1275$  W/mK
  - $\rho=850$  kg/m<sup>3</sup>
  - $\mu=0.02$  Pa.s
  - $C_p=2000$  kJ/kg.K
- Solid properties:
  - $\lambda=80, 237$  or  $398$  W/mK

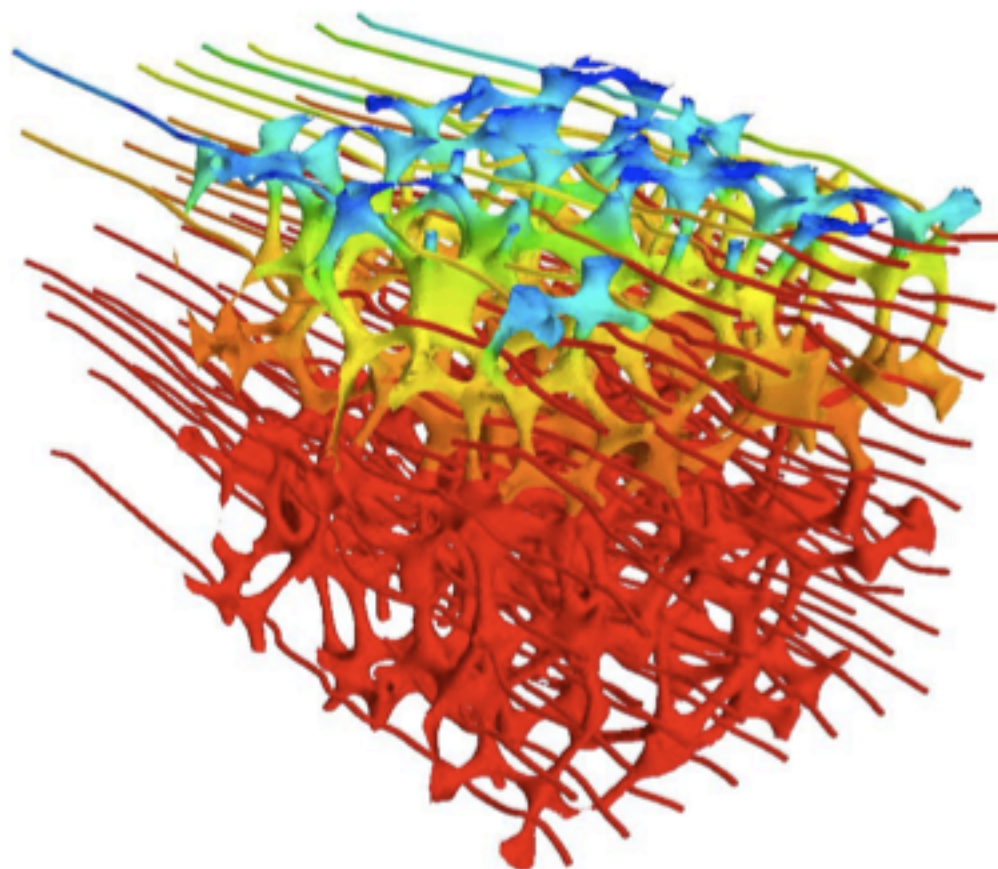
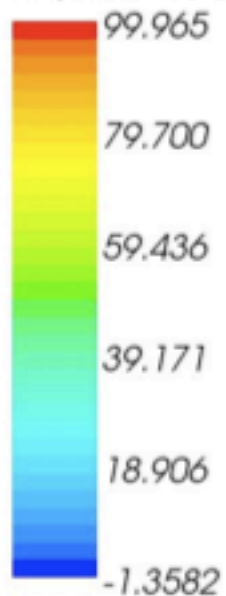
# Champ de vitesse



# Lignes de courant



Temperature (C)



Temperature (K)

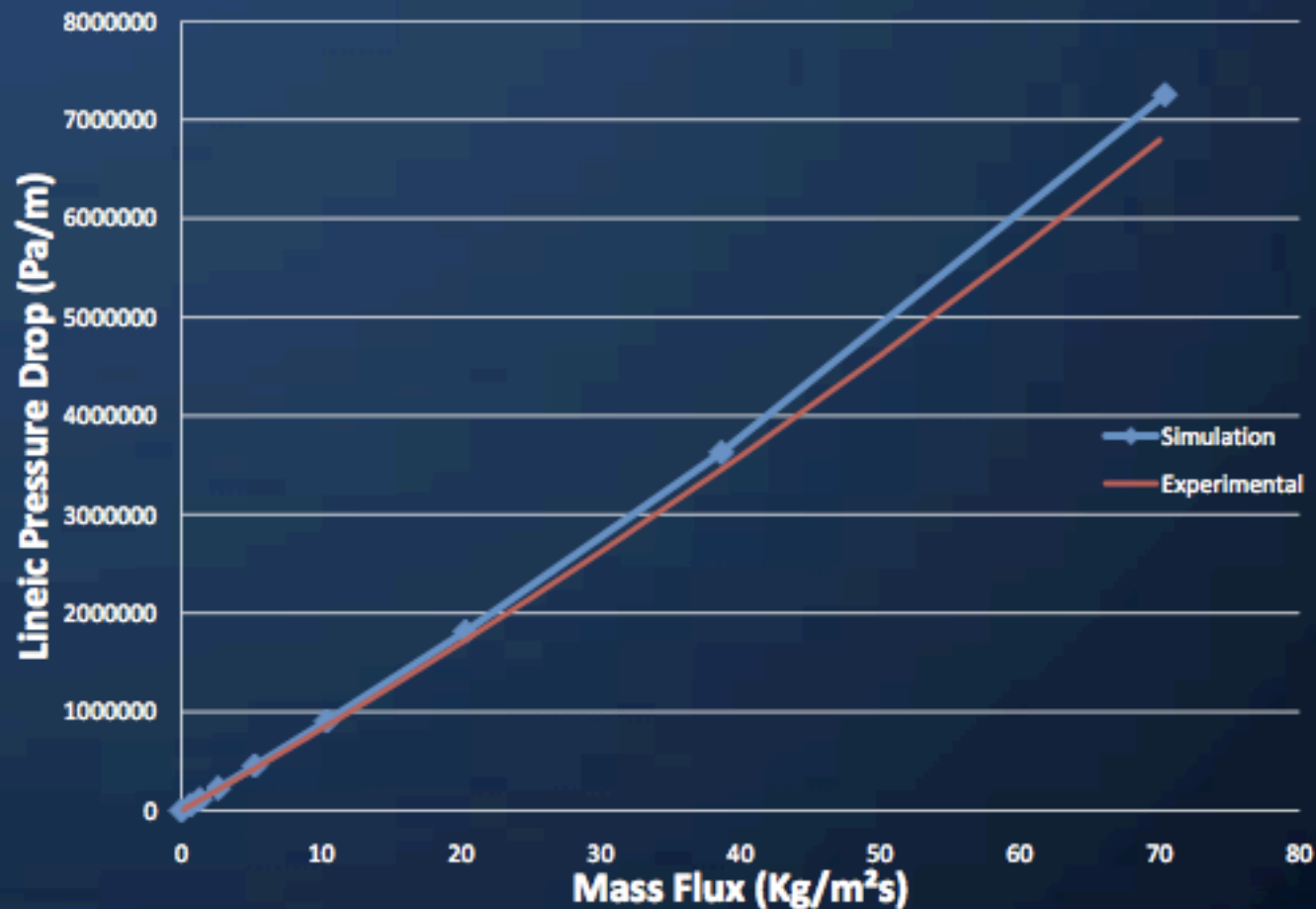




# Validation : Loi d'écoulement

$$-\frac{dP}{dx} = \frac{\mu}{K} \langle u \rangle + \beta \rho \langle u \rangle^2$$

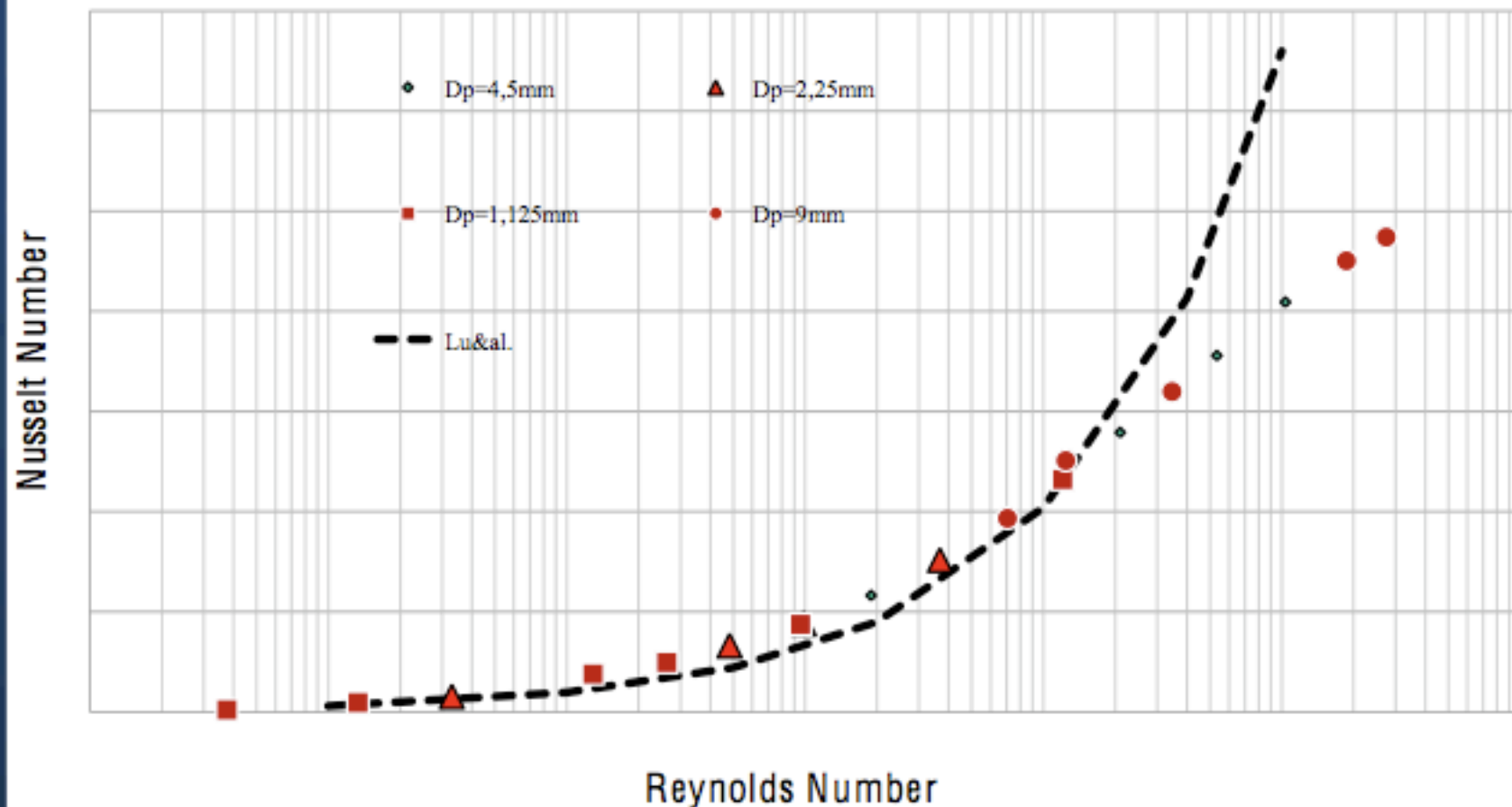
Forchheimer (K permeability,  $\beta$  viscous term)



K  
1.39e-7 (Simu)  
1.50e-7 (Exp)

$\beta$   
289 (Simu)  
244 (Exp)

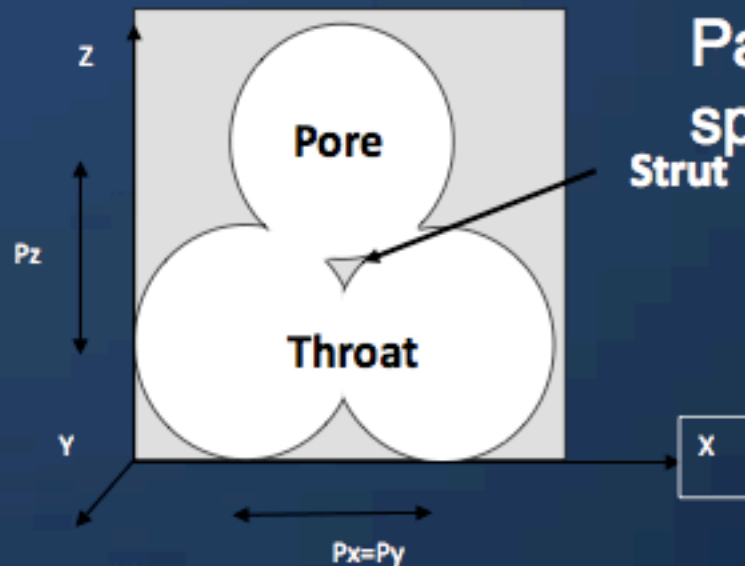
# Coefficient d'échange local



Bon accord avec la littérature (Lu&al.) pour les coeff. D'échange brin/fluide pour les faibles Reynolds

Pour les hauts Re : Effet d'entrée + maillage non adapté

# Vers une géométrie optimisée

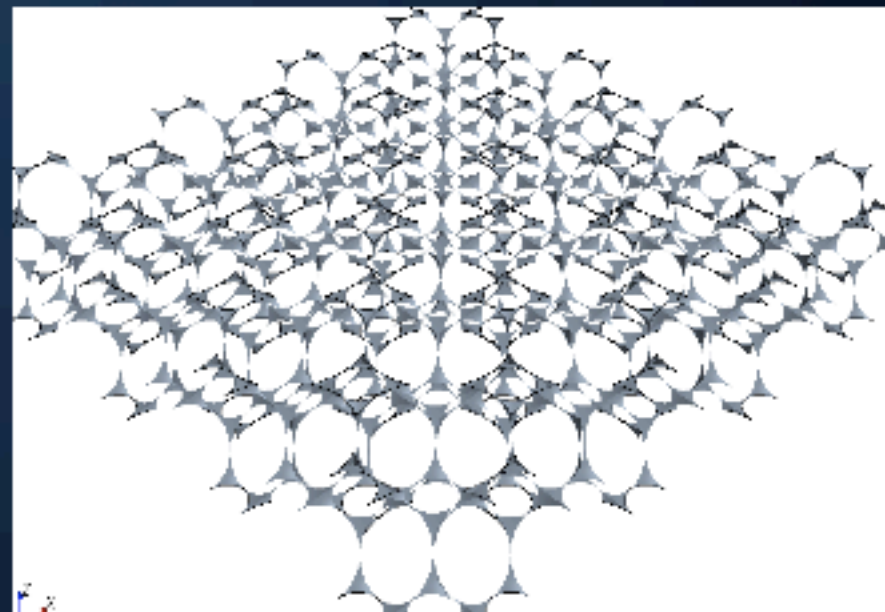


Packed bed of interconnected spheres :

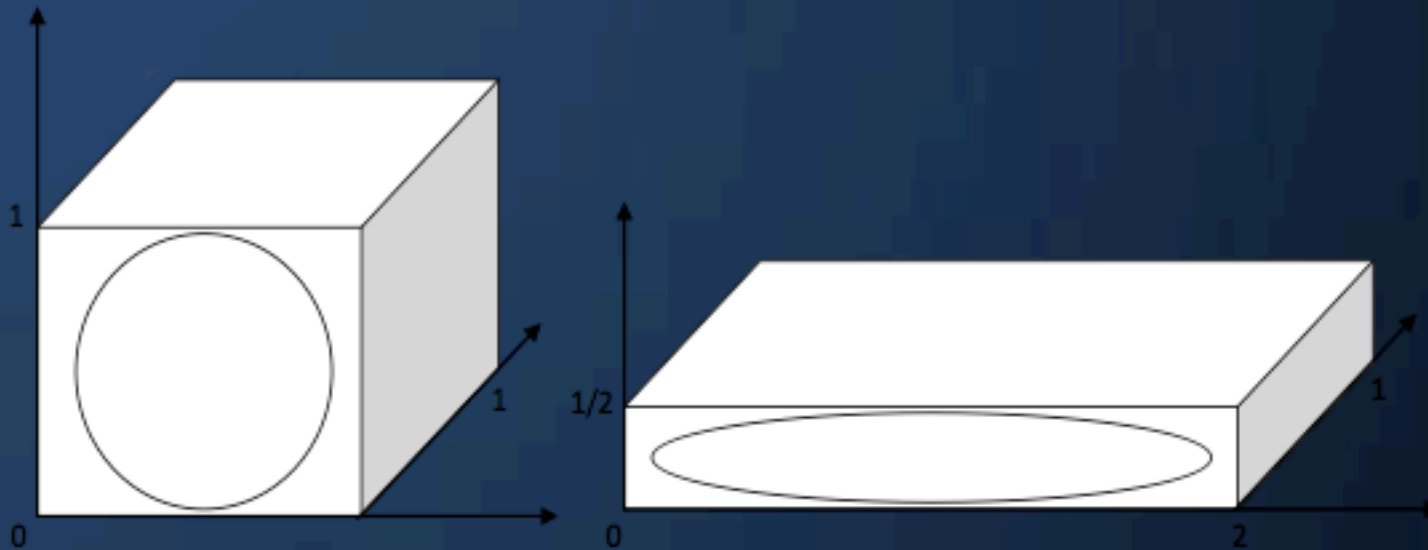
- Spheres diameters
- X, Y and Z pitches

The dual of the packed spheres :

- Pore and Throat diameter
- Porosity



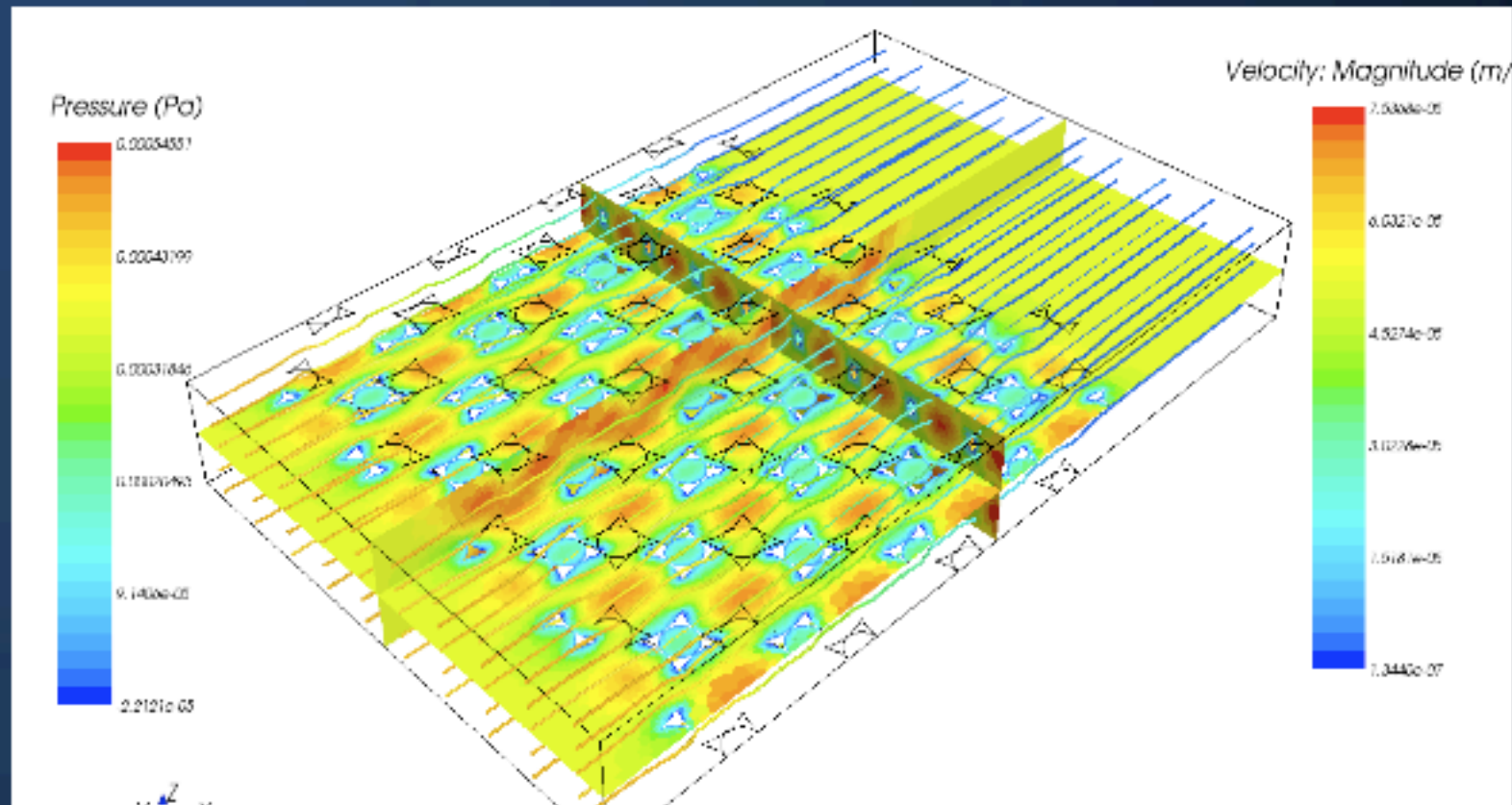
# Contrôle de la forme du pore



**Numerical scaling = Pore shape stretching :**

- Constant mean pore and throat diameters
- Constant porosity
  
- Control of the pore shape : elongation in each directions

# Resultats



From Local Pressure and Velocity Fields to Effectives Properties :

$$-\nabla P = \mu \frac{U}{K} + \rho \beta U^2$$

Forchheimer model :

# En cours

**Méthodologie de dimensionnement opérationnelle pour les cas « classiques »**

**Utilisation de la méthodes sur les conditions « thermoacoustiques »**

**Modèle LBM des transferts couplés**

**dispersion en milieux poreux**

**Ecoulements instationnaires**

**Travail aux petites échelles et rarefaction**