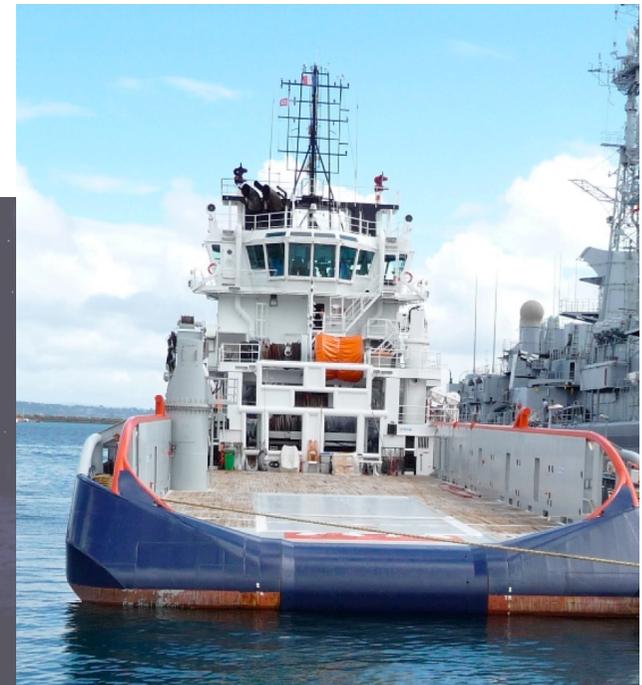
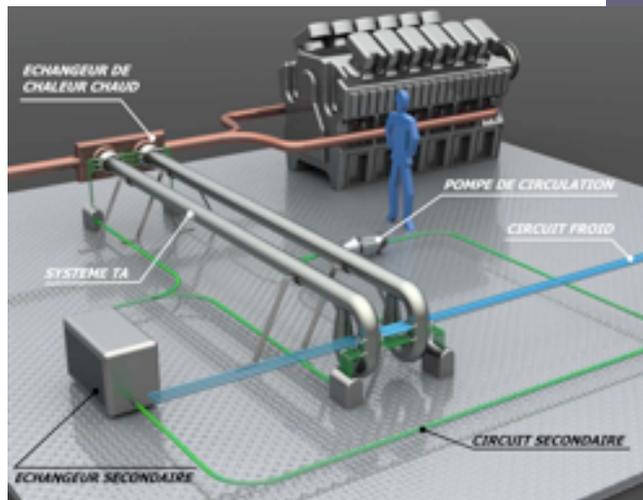


Journée SFT

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

INSTITUT UNIVERSITAIRE DES SYSTEMES THERMIQUES INDUSTRIELS



IUSTI U.M.R. 6595



Laboratoire IUSTI D^{pt} 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,

Milieux divisés et fluides complexes

Deux axes transverses :

diagnostics optiques et biomécanique

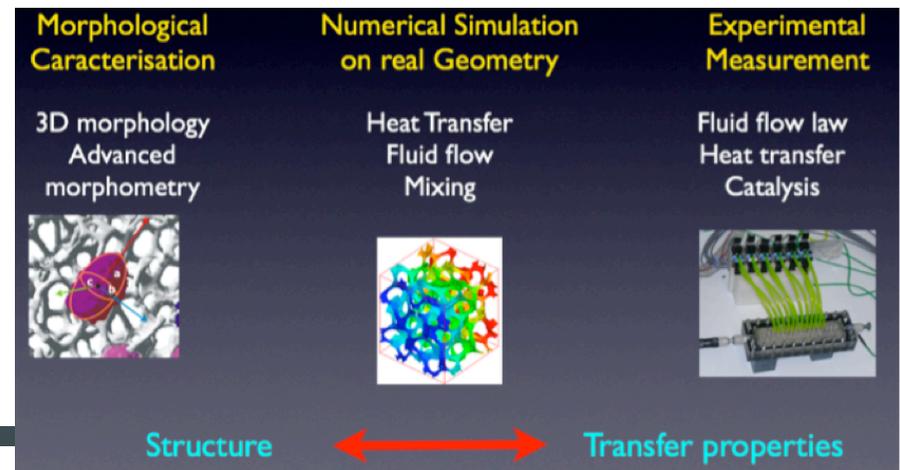
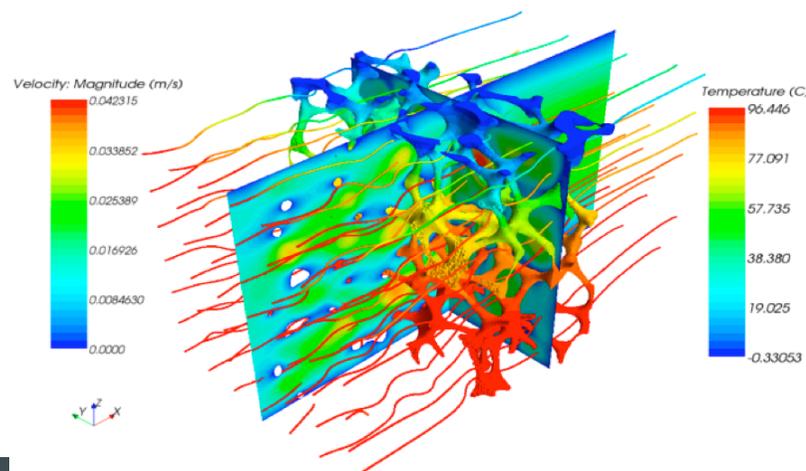
L'IUSTI membre des pôles: Cap Energie et mer PACA

iusti

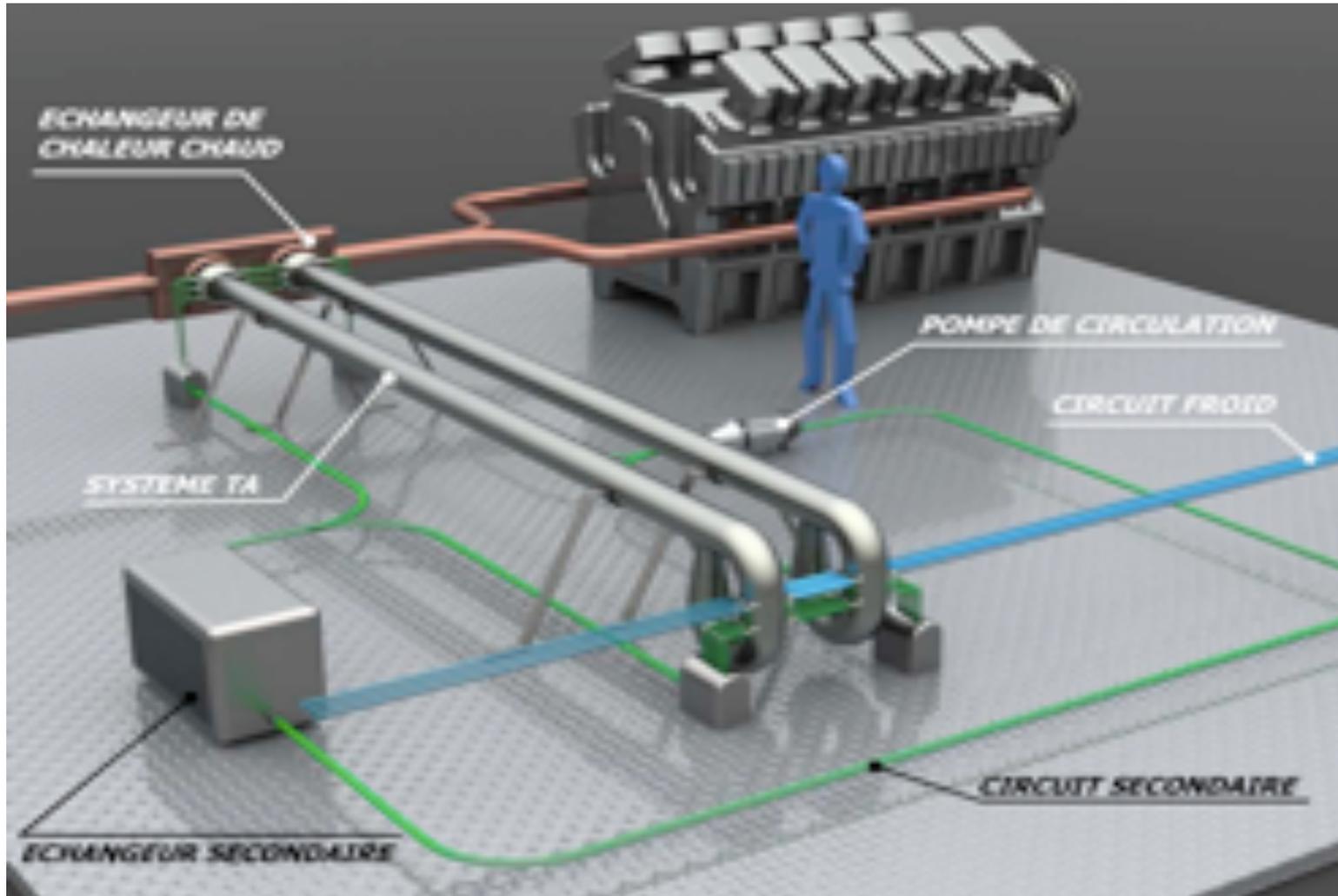
Milieux Hétérogènes et Transfert

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

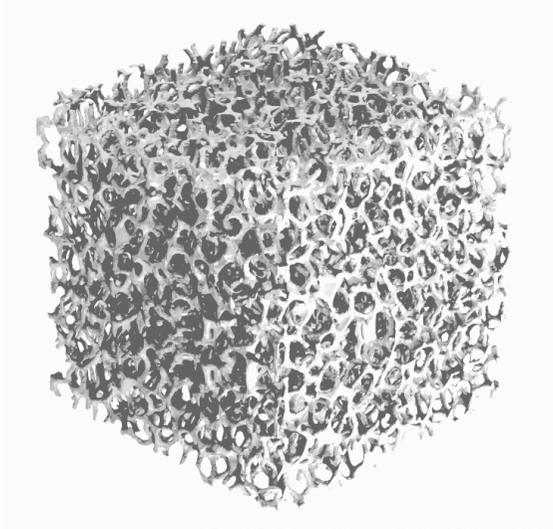
et très intéressant du point vue applicatif

Impact fort sur les transferts

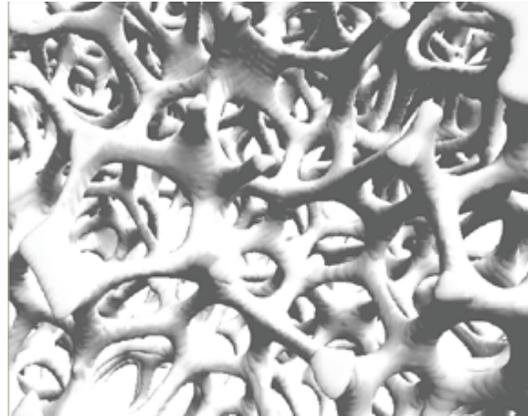
- **Caractérisation morphologique insuffisante**
- **Peu de données et forte dispersion (écoulement, conductivité, échange de chaleur...)**
- **Pas d'études en diphasique**

Quelques exemples de mousses

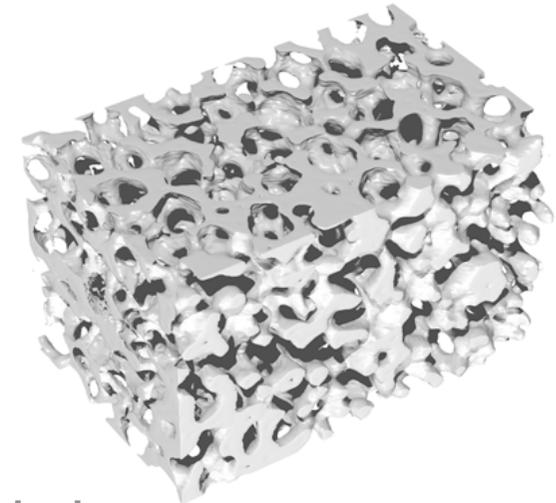
NiCr foams – Recemat
(10,20,30,40,50,100 ppi)



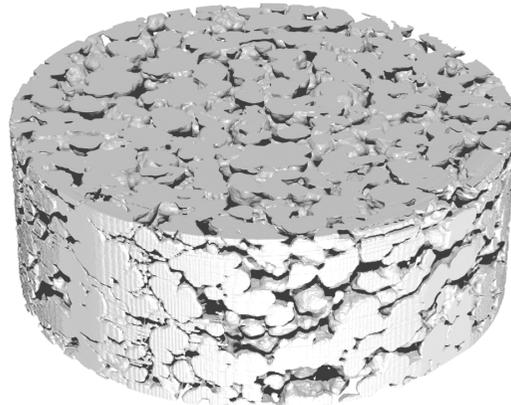
Al foams – ERG (5,10,20 ppi)



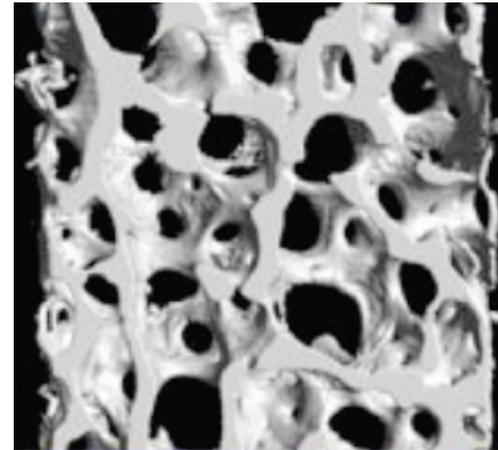
CTIF Stochastic foam



Sinterea 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**

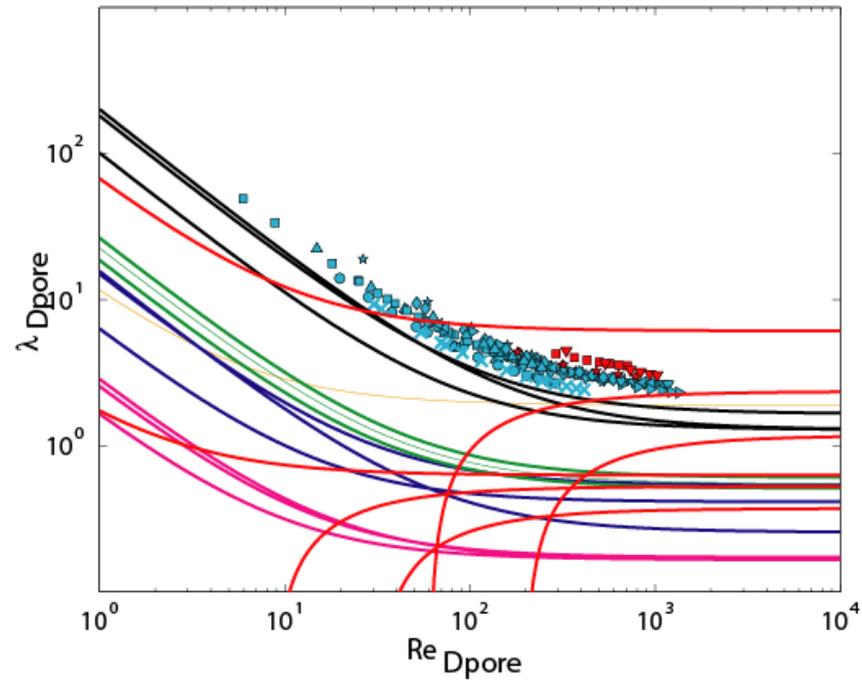
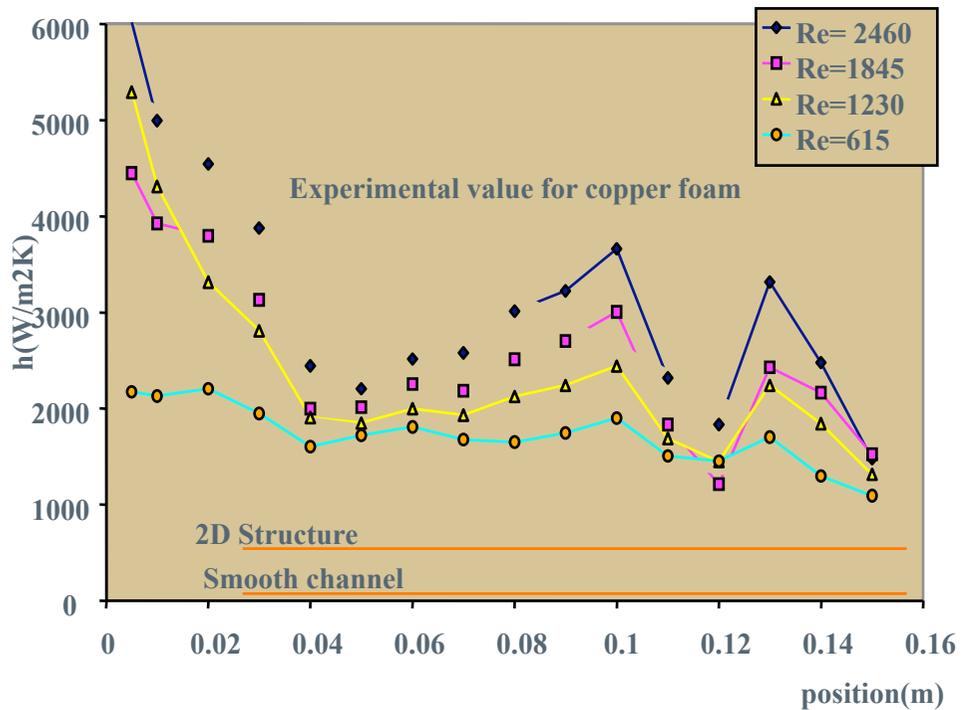
Problématique

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 :

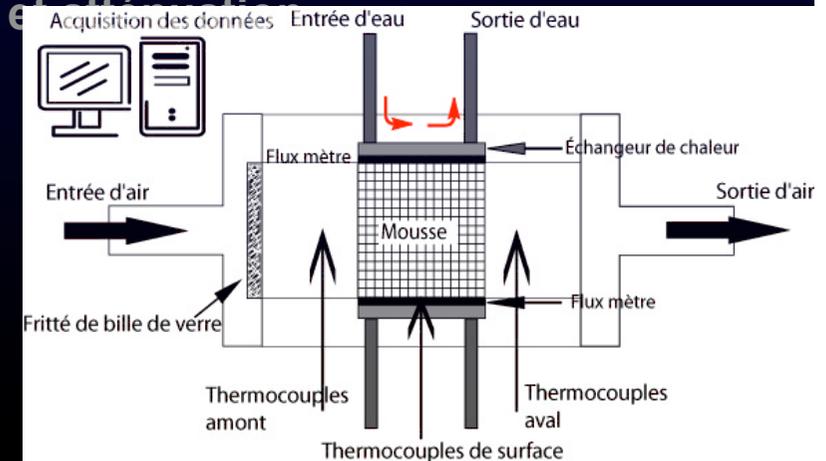
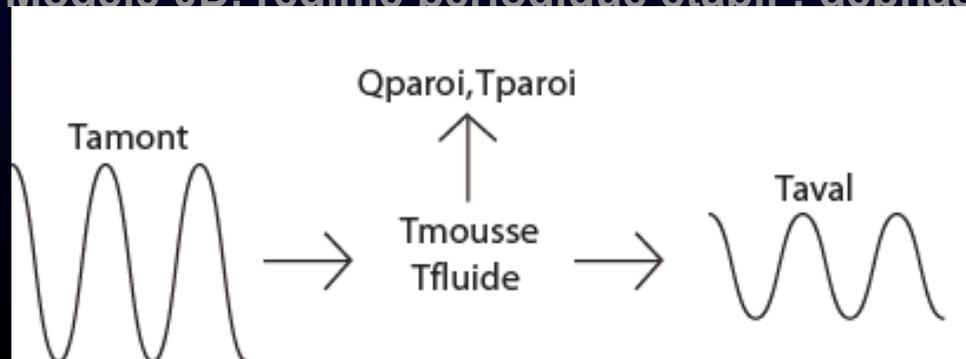
- coefficient d'échange entre phases
- dispersion

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

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

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

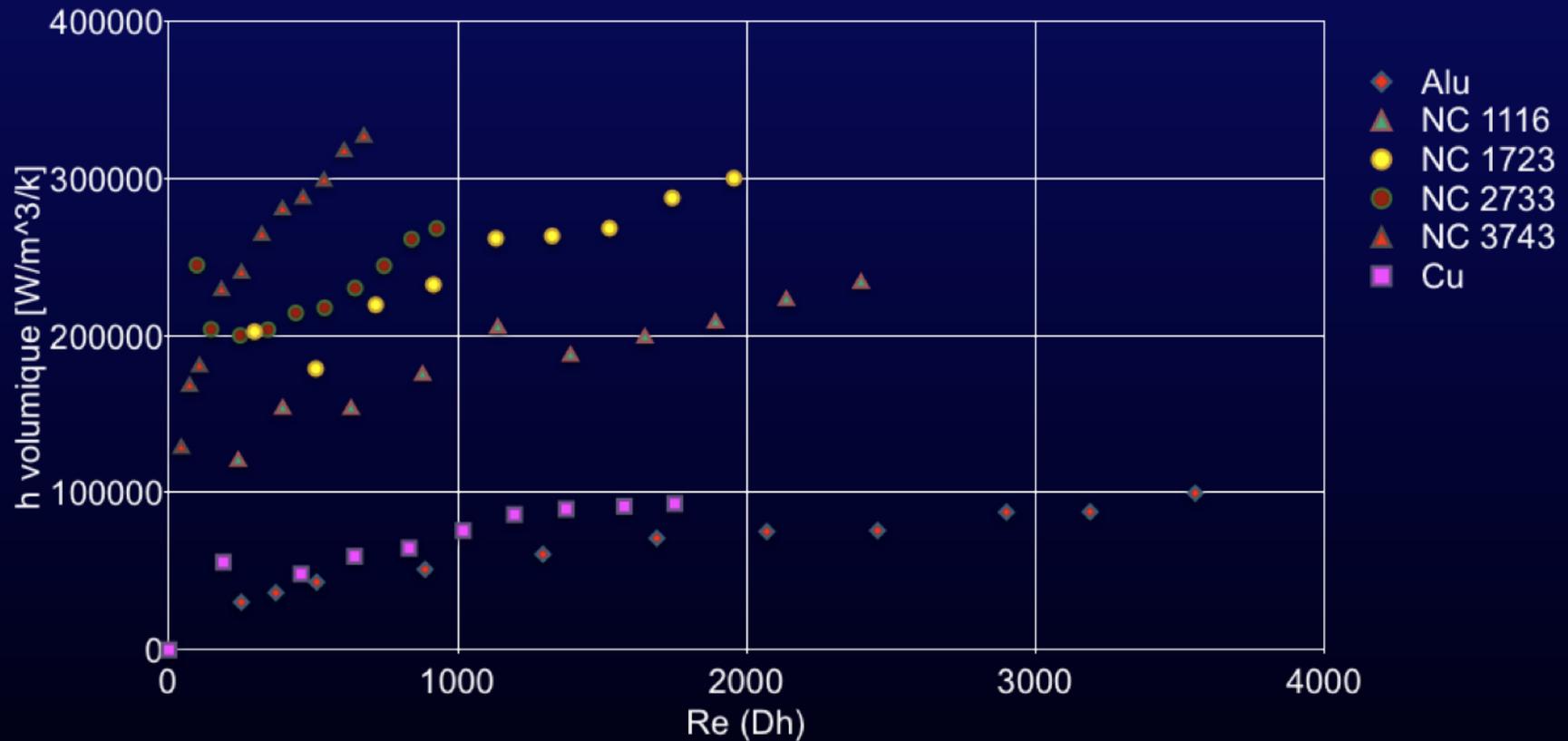
$$T_p = T_{p1} + T_{p2} \cos(\omega t) + T_{p3} \sin(\omega t)$$

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

○ 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

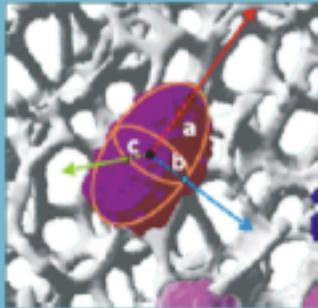


○ Corrélation à la morphologie

Méthodologie

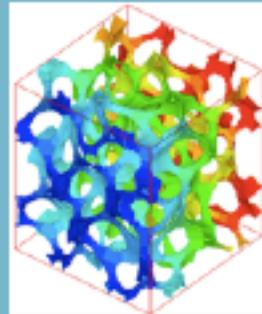
Morphological Characterisation

- 3D morphology
- Advanced morphometry



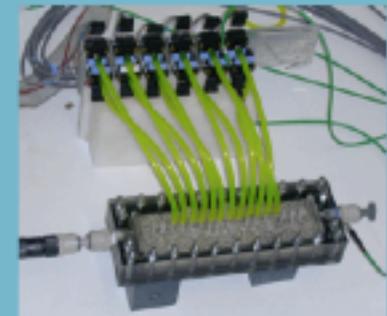
Numerical Simulation on real Geometry

- Heat Transfer
- Fluid flow
- Mixing



Experimental Measurement

- Fluid flow law
- Heat transfer
- Catalysis



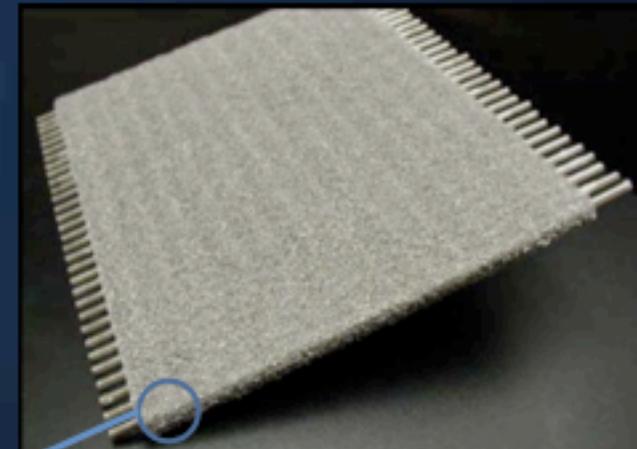
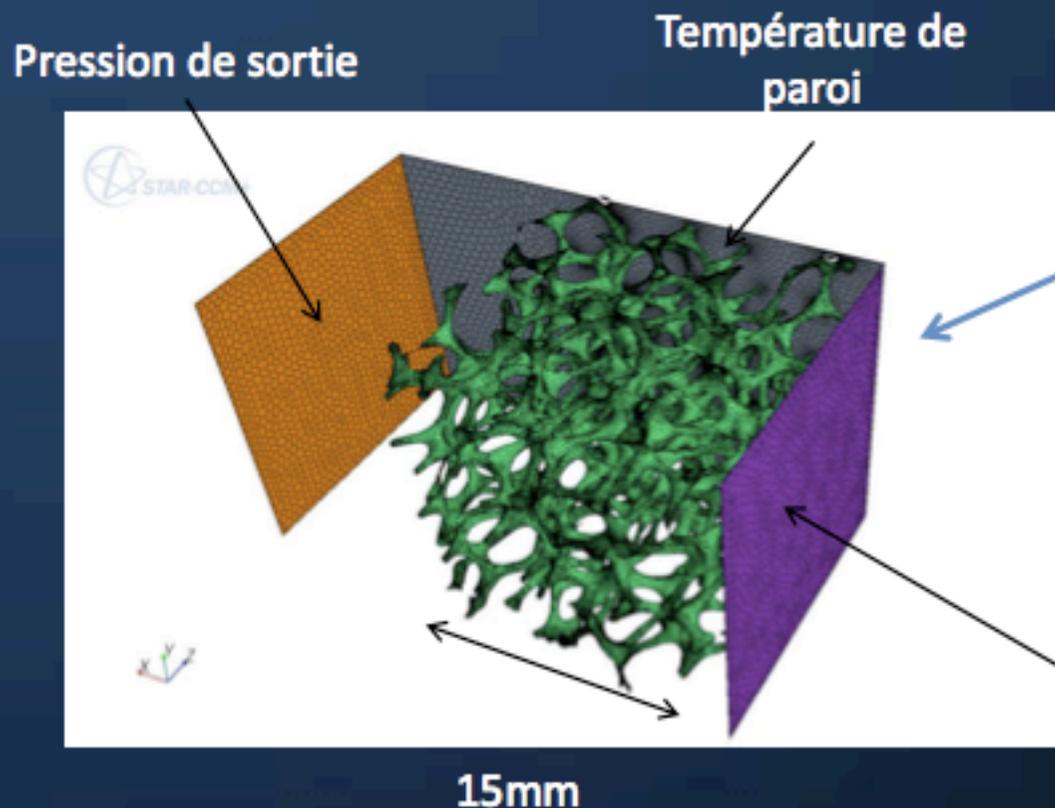
Structure



Transfer properties

Volume représentatif d'un échangeur de chaleur

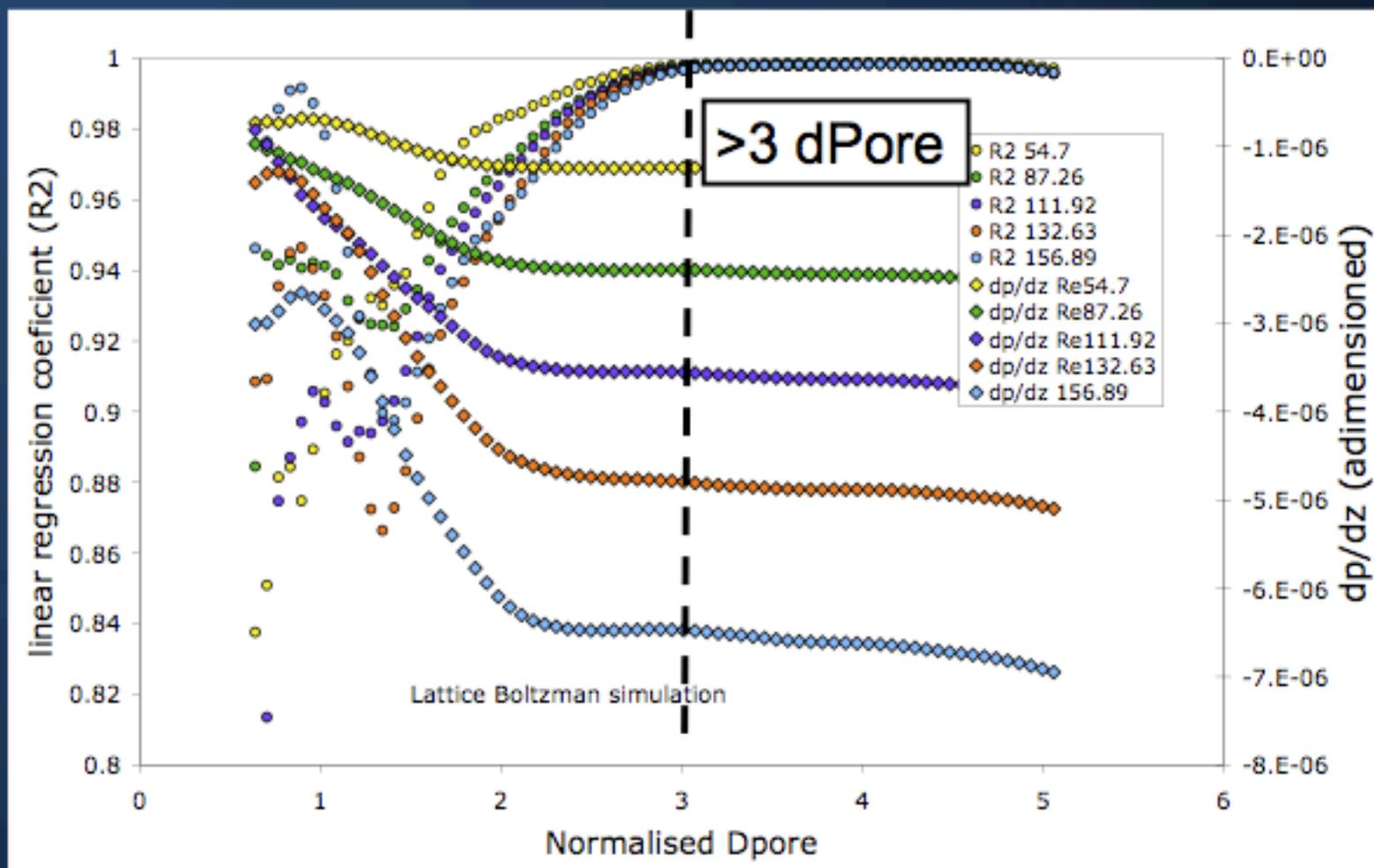
Simulation sur StarCCM+ de CD- Adapco



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

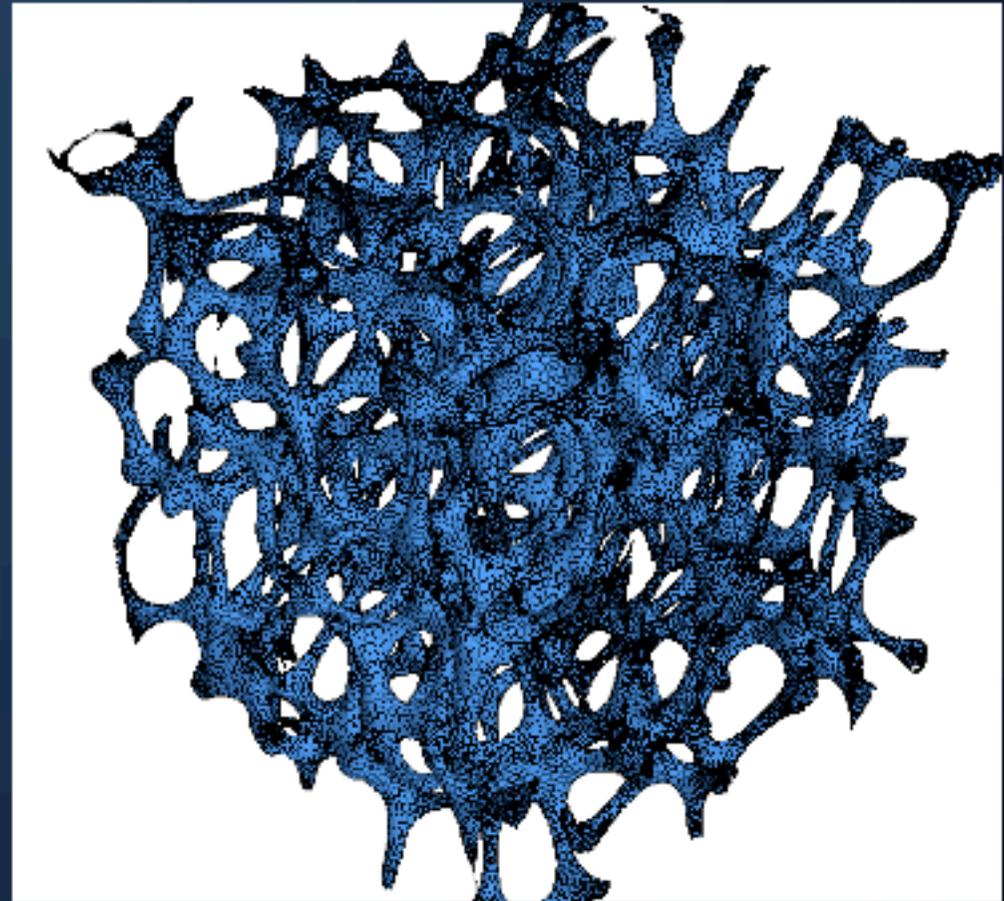
Pression d'entrée
ou débit massique

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)



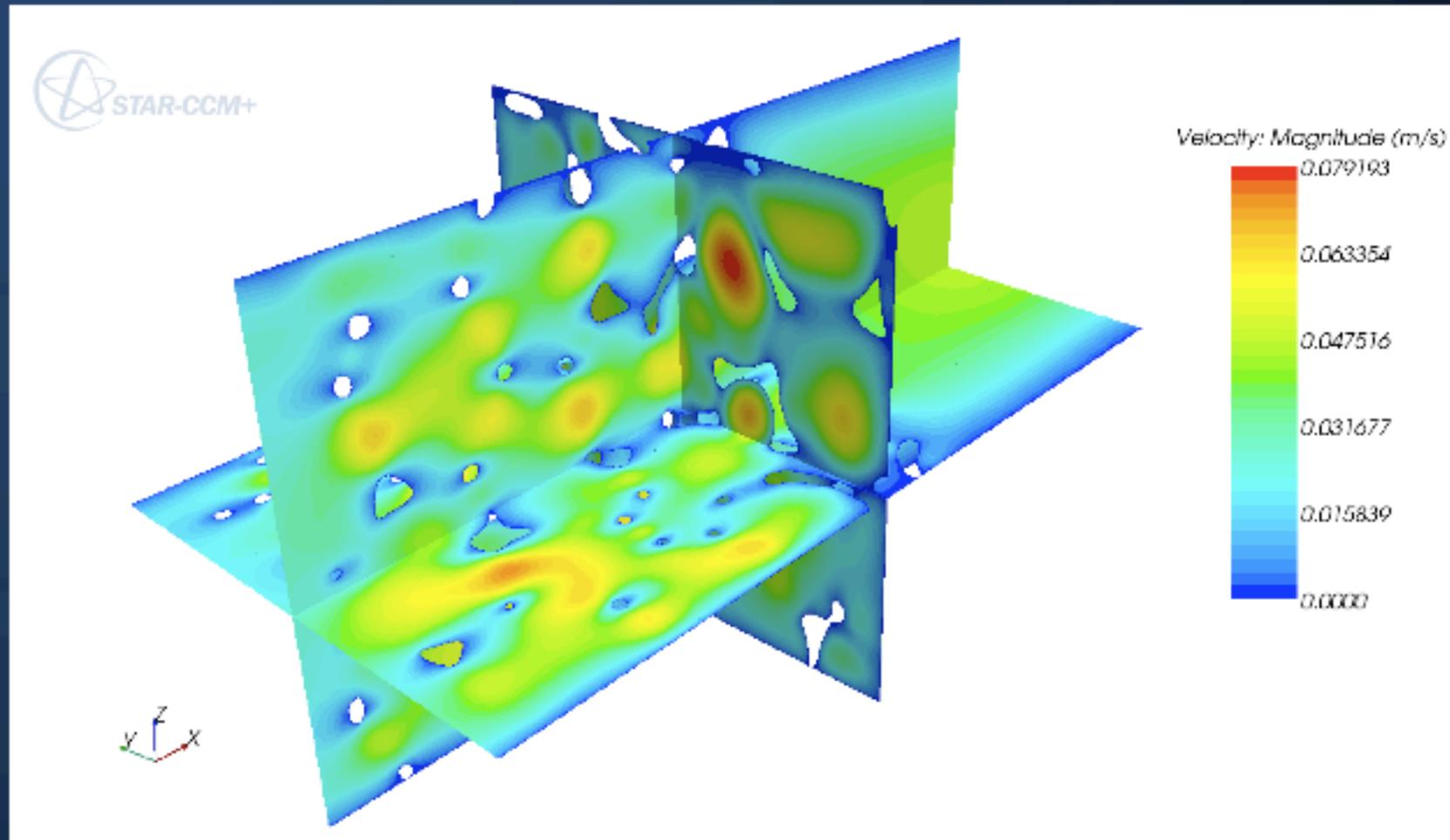
Représentation de la phase solide maillée

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/m³
 - $\mu=0.02$ Pa.s
 - $C_p=2000$ kJ/kg.K
- Solid properties:
 - $\lambda=80, 237$ or 398 W/mK

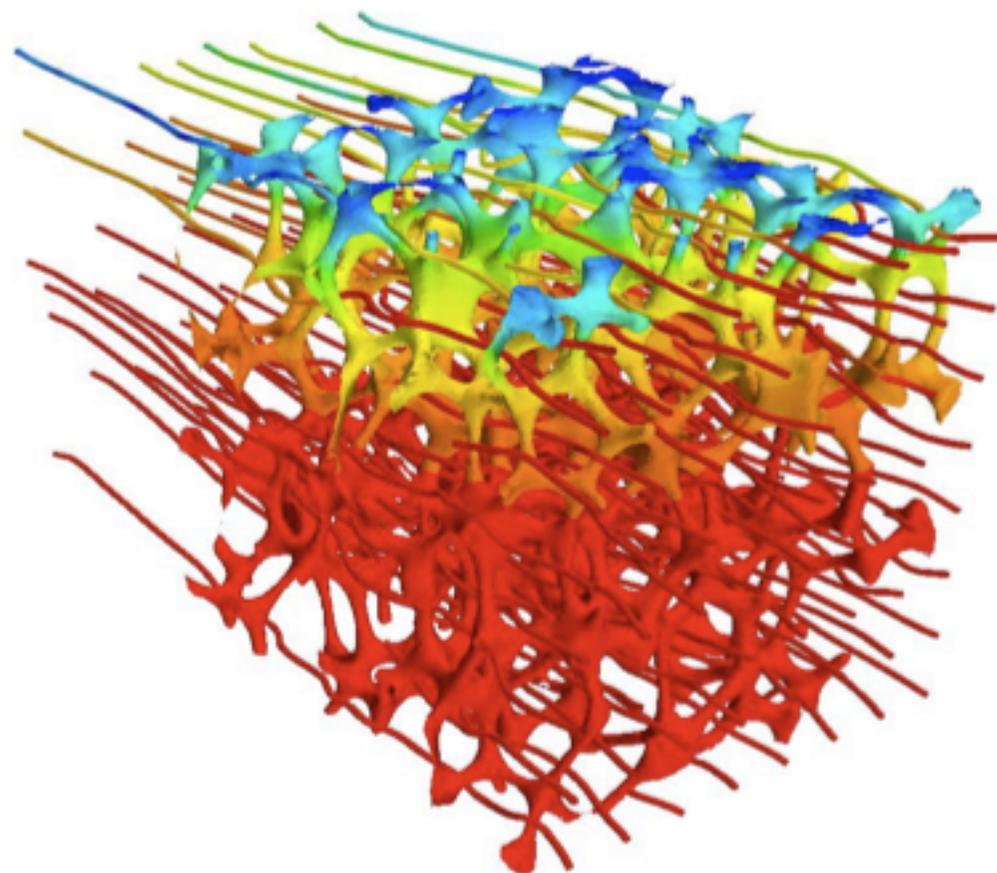
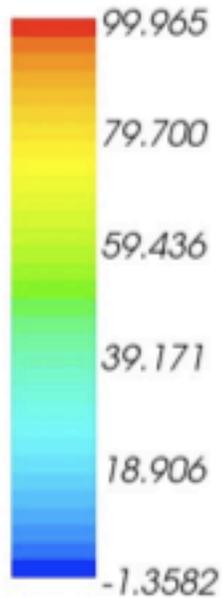
Champ de vitesse



Lignes de courant



Temperature (C)



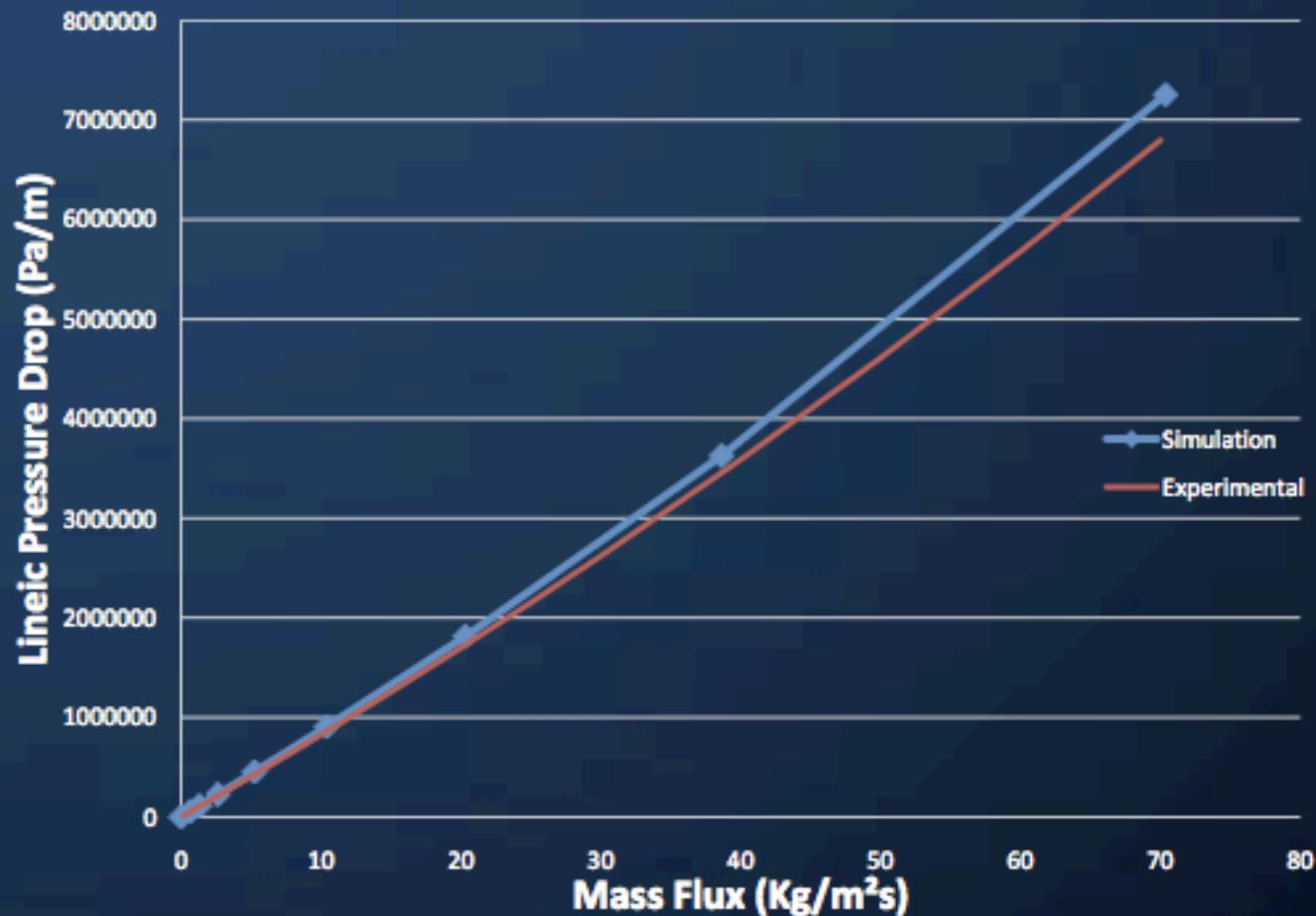
Temperature (K)



Validation : Loi d'écoulement

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

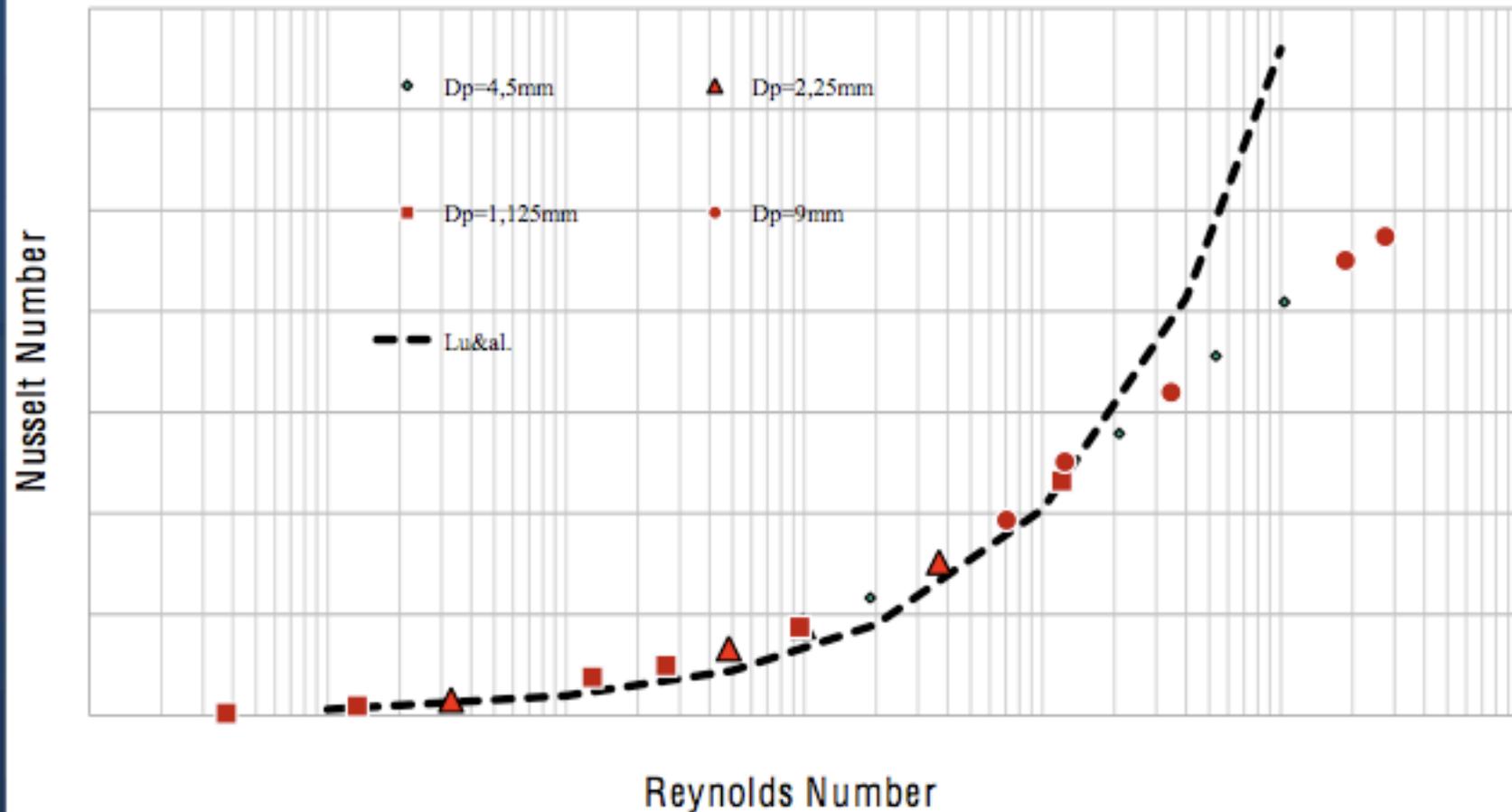
Forchheimer (K permeability, β viscous term)



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

β
289 (Simu)
244 (Exp)

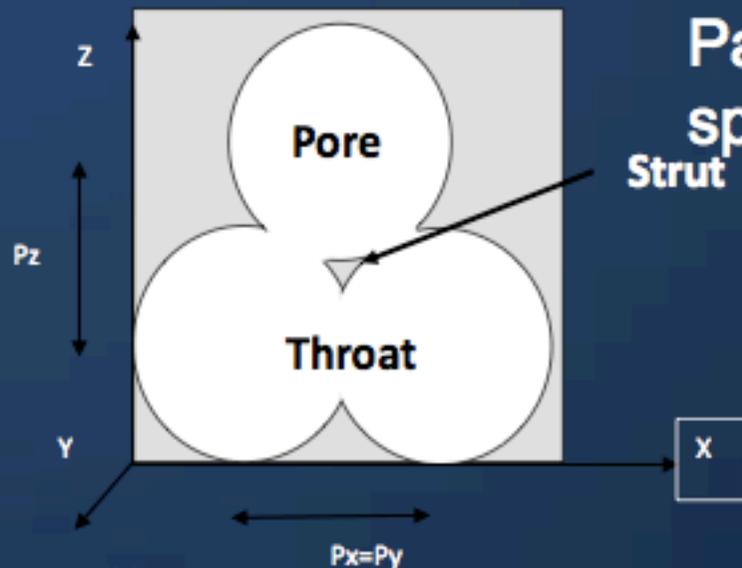
Coefficient d'échange local



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

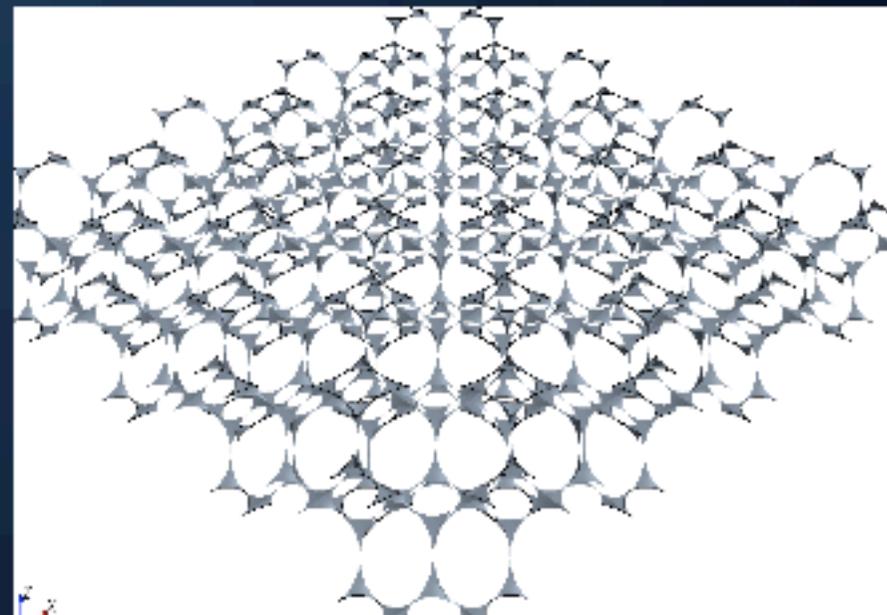


Packed bed of interconnected spheres :

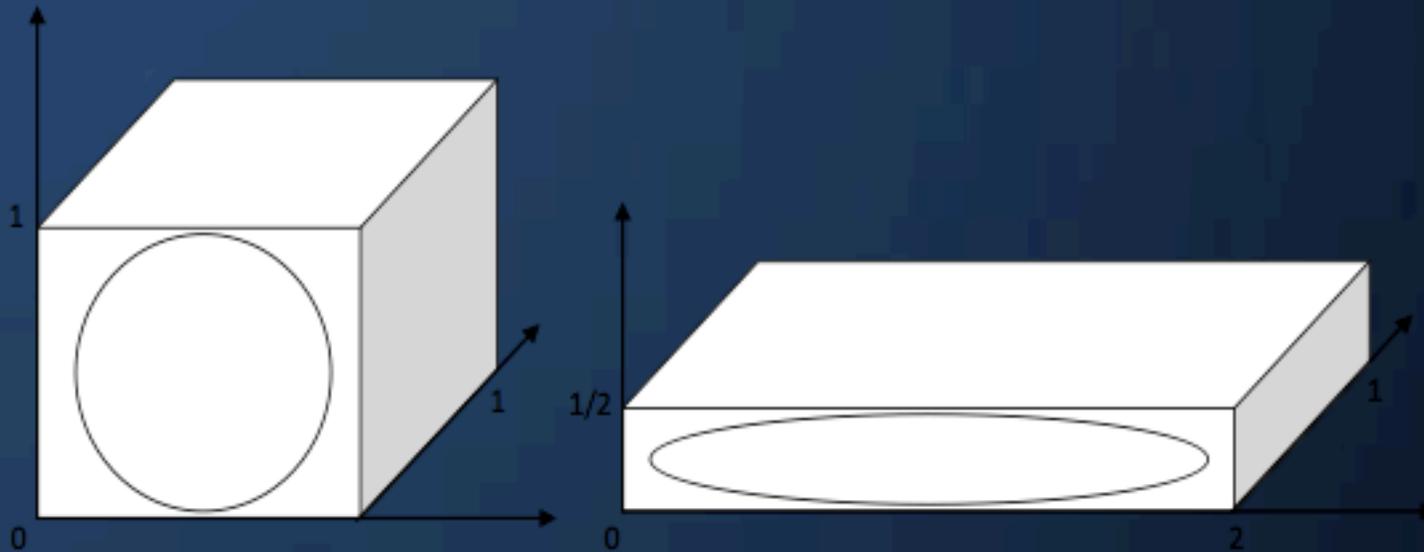
- Spheres diameters
- X, Y and Z pitches

The dual of the packed spheres :

- Pore and Throat diameter
- Porosity



Contrôle de la forme du pore

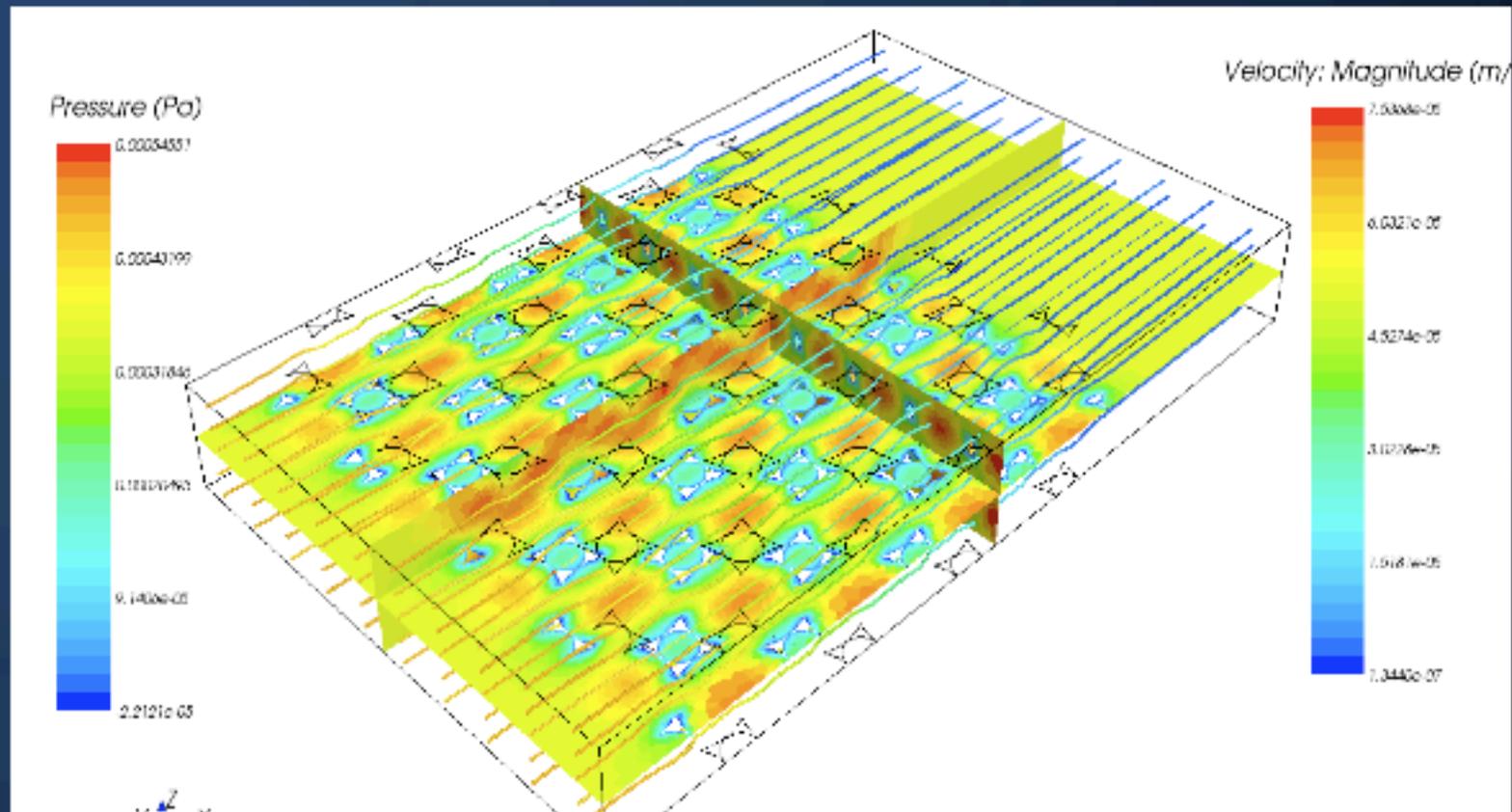


Numerical scaling = Pore shape stretching :

- 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