

# Simulation de réacteurs multicanaux compacts : utilisation de zones poreuses équivalentes

Ghislain GENIN



**Equipe PRISM** (dirigée par Jean Marc COMMENGE)  
Procédés **P**hotoniques, **R**éactifs, **I**ntensifiés et **S**ystèmes **M**icrostructurés



**UNIVERSITÉ  
DE LORRAINE**

**Laboratoire Réactions et Génie des Procédés**

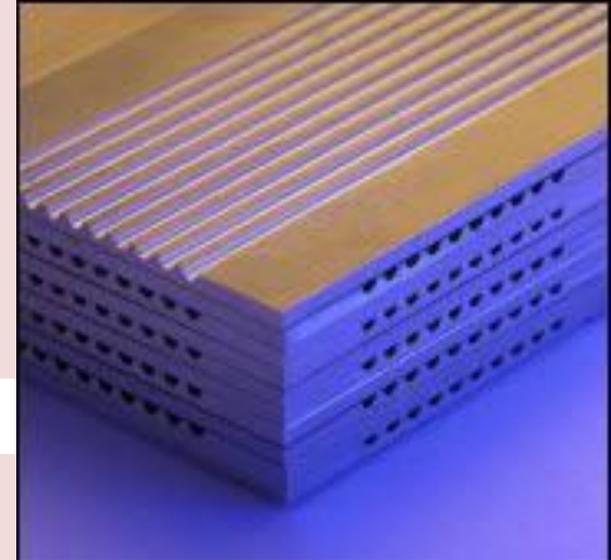


Journées Promotion Procédés Produits  
NANCY – ENSIC – mardi 25 novembre 2014

Utilisation de la CFD en génie des procédés  
*Gestion de la complexité des systèmes*

## Intensification, miniaturisation des procédés

*Réacteurs – Echangeurs multicanaux*  
*Co-courant*  
*Contre-courant*  
*Courants croisés*



## Besoins en simulation fine 3D

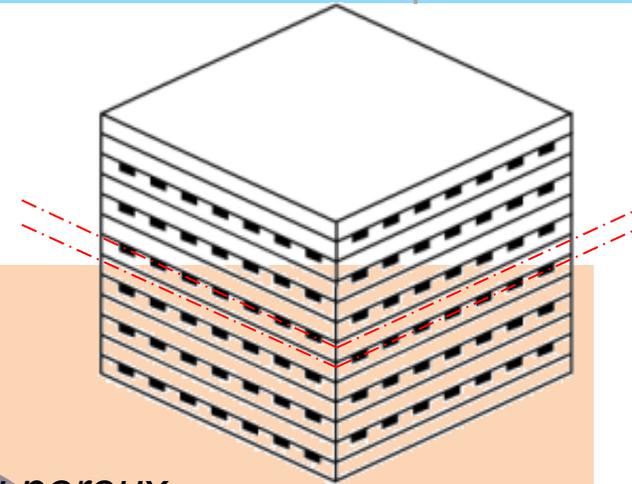
*Cartes de température / pression / concentration*  
*Résistance mécanique et chimique*  
*Limiter le nombre d'essais sacrificiels (coûts et délais de fabrication)*  
*Visualiser les maldistributions hydrodynamique / thermique*

## Difficultés des simulations

*Nombre de canaux élevé*  
*Facteurs de formes des canaux importants (L/D)*  
*Nombre de faces / volumes (dessin + maillage)*

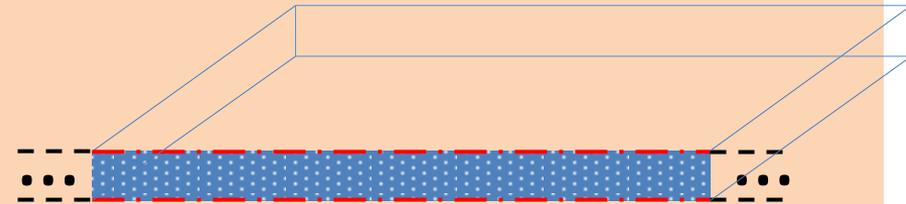
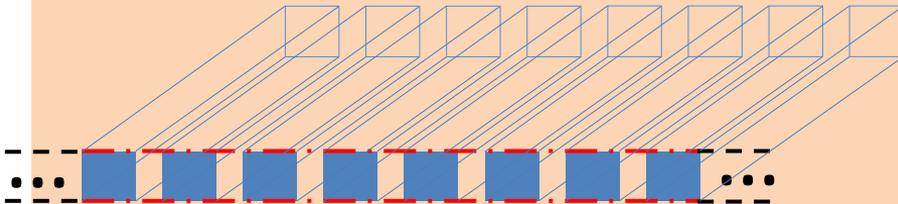
## Réduction géométrique

*Seule une couche élémentaire est considérée  
(non visualisation de la maldistribution entre couches)*



## Nouvelle simplification : utilisation de milieux poreux équivalents

*Série de canaux et parois assimilées à un milieu poreux*



⇒ *Diminution du nombre de faces, de volumes, de mailles*

## Comment définir ce poreux pour qu'il soit équivalent ?

*Perte de charge*

*Transfert thermique*

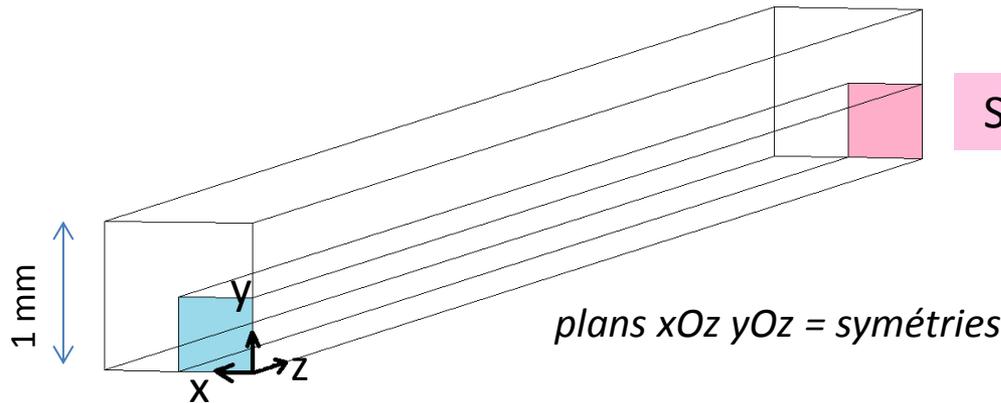
*Vitesse globale de réaction*

# Résistance équivalente du milieu poreux

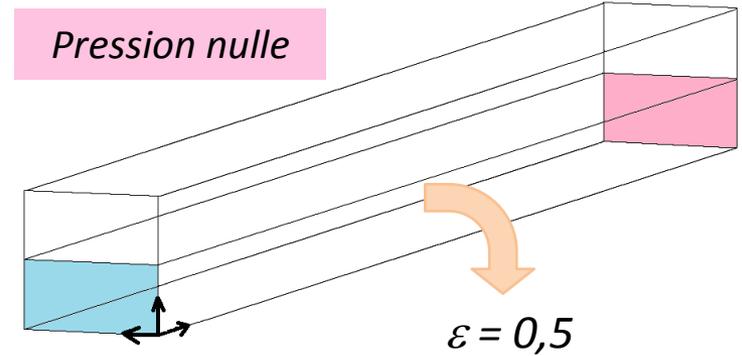
## Simulation sur un canal

Fluide = air

Longueur de 2 cm  
 Mailles hexaédrique de 0,05 mm  
 160 000 mailles



Sortie



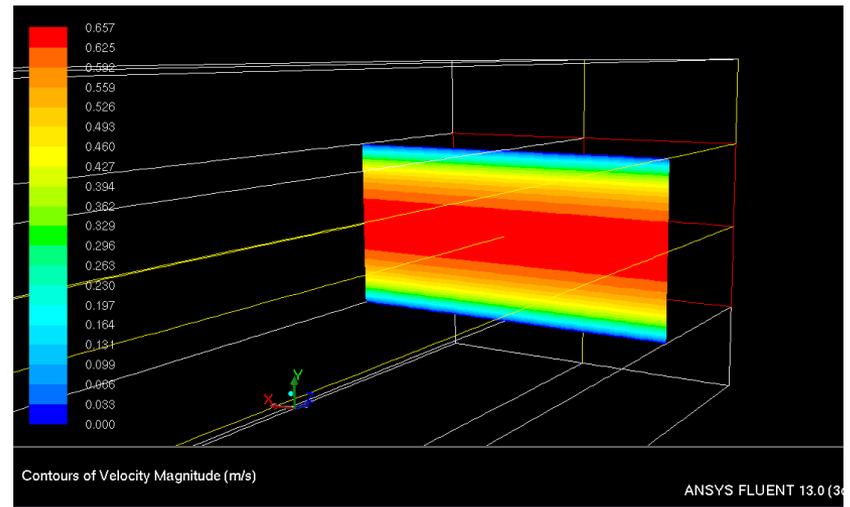
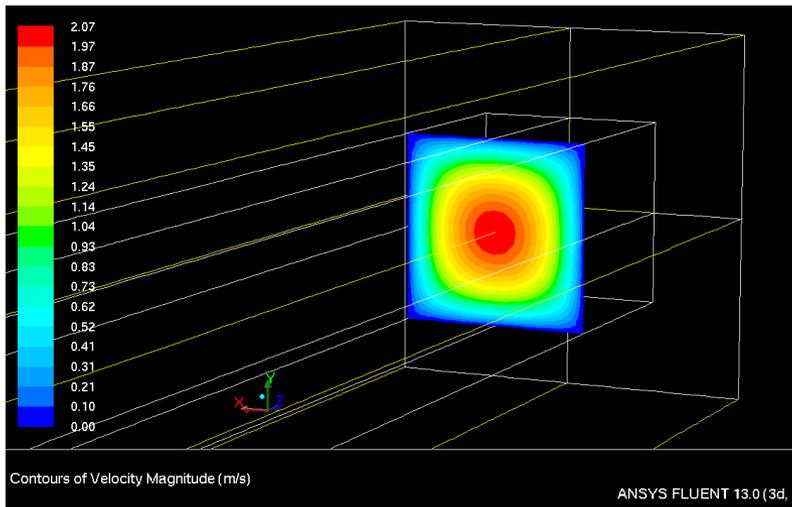
Entrée  $u_{moy} = 1 \text{ m/s}$   
 ( $Re = 68,5$ )

Profil de vitesse établi

Entrée  $u_{moy} = 0,5 \text{ m/s}$

Profil de vitesse dans le canal

Profil de vitesse (interstitielle) dans le poreux ( $\epsilon = 0,5$ )



$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\lambda_{nc}}{D_H^2} \mu u$$

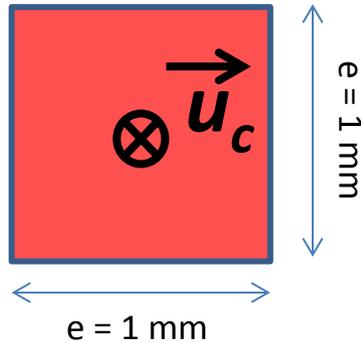
R

 $\mu u$ 

Résistance équivalente du milieu poreux

**Valeur théorique de la résistance : loi de Poiseuille**

(dans le cas d'un profil de vitesse uniforme)



$$R_1 = 2,848 \cdot 10^7 \text{ m}^{-2} \begin{cases} \lambda_{nc} = 0,89 \\ D_H = e \end{cases}$$

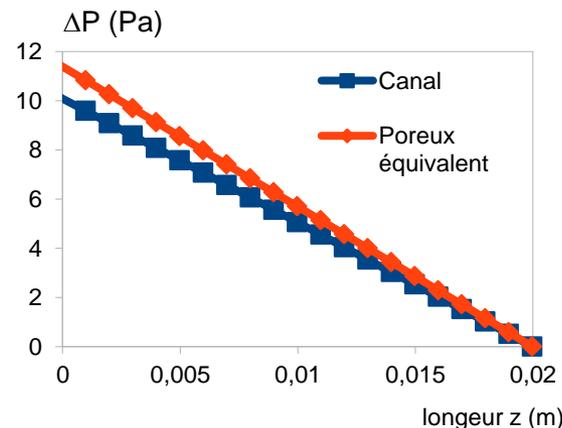


$$R_2 = 1,2 \cdot 10^7 \text{ m}^{-2} \begin{cases} \lambda_{nc} = 1,5 \\ D_H = 2e \end{cases}$$

**Résistance du milieu poreux**

Résistance supplémentaire imposée au milieu poreux pour modéliser la présence des canaux

$$R_p \cong \frac{R_1}{\varepsilon} - R_2$$

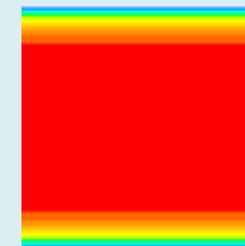
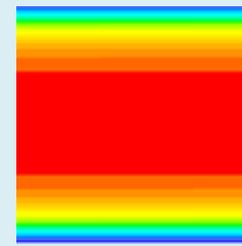
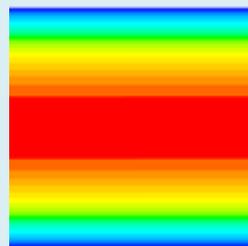


$\Delta P$  surestimée :  
influence du profil de  
vitesse...

*Résistance équivalente du milieu poreux*

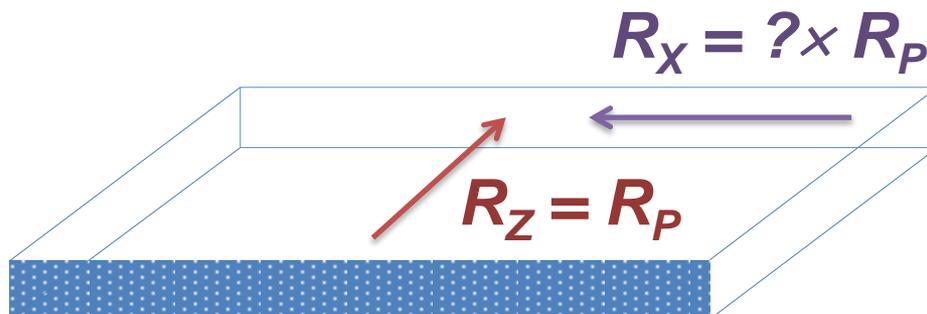
## Réglage fin de la résistance du milieu poreux

*L'augmentation de la résistance déforme le profil de vitesse*



$\Rightarrow R_p$  obtenue par itérations pour obtenir  $\Delta P_p = \Delta P_c$

## Résistances sur les 3 axes du milieu poreux

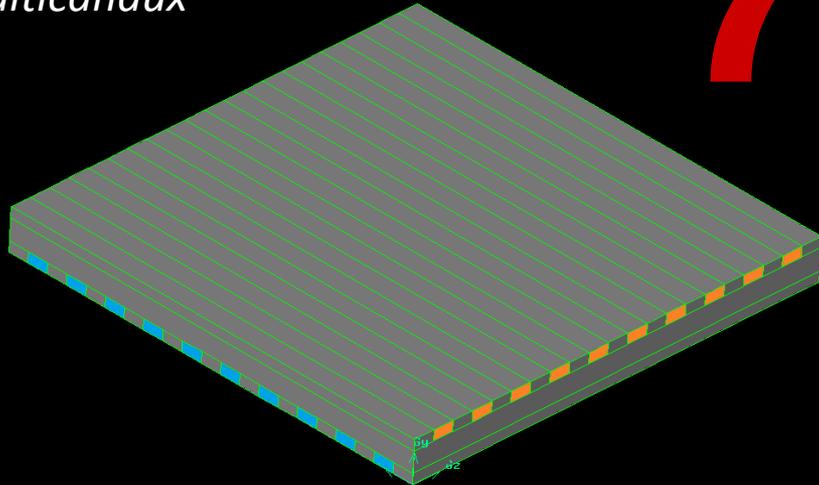


Valeur  $R_x$  élevée pour modéliser les parois des canaux

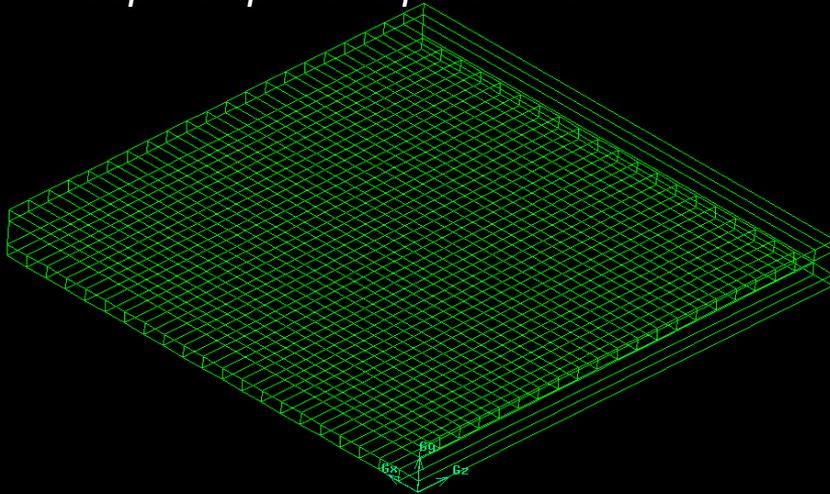
$\uparrow R_y = 0$

# Un exemple : échangeur air-air à courants croisés

*multicanaux*

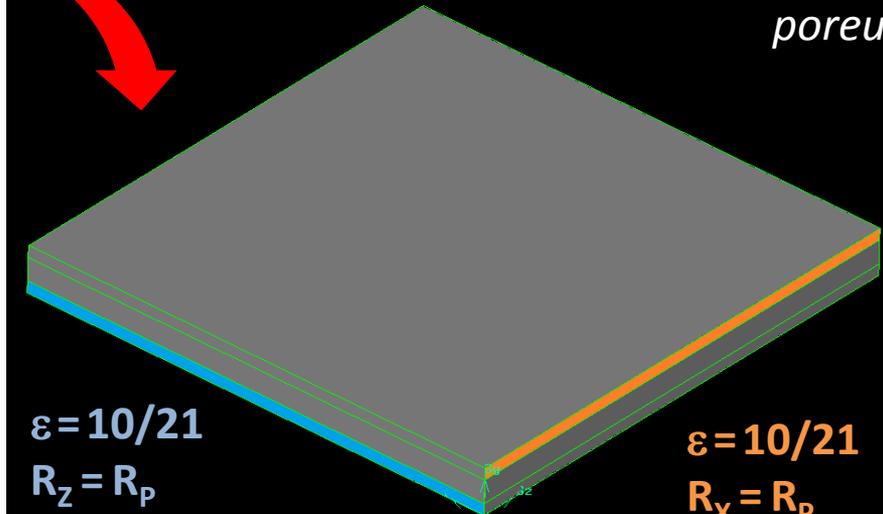


10 canaux de section carrée de côté 1 mm  
séparés par des parois de 1 mm



Maillage structuré hexaèdre de 0,1 mm de côté => 882 000 mailles

*poreux*

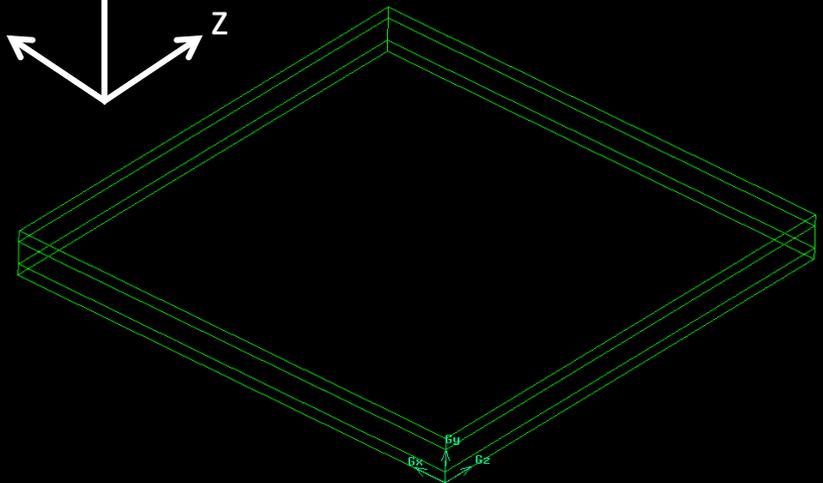
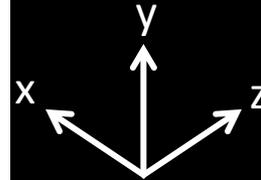


$$\varepsilon = 10/21$$

$$R_z = R_p$$

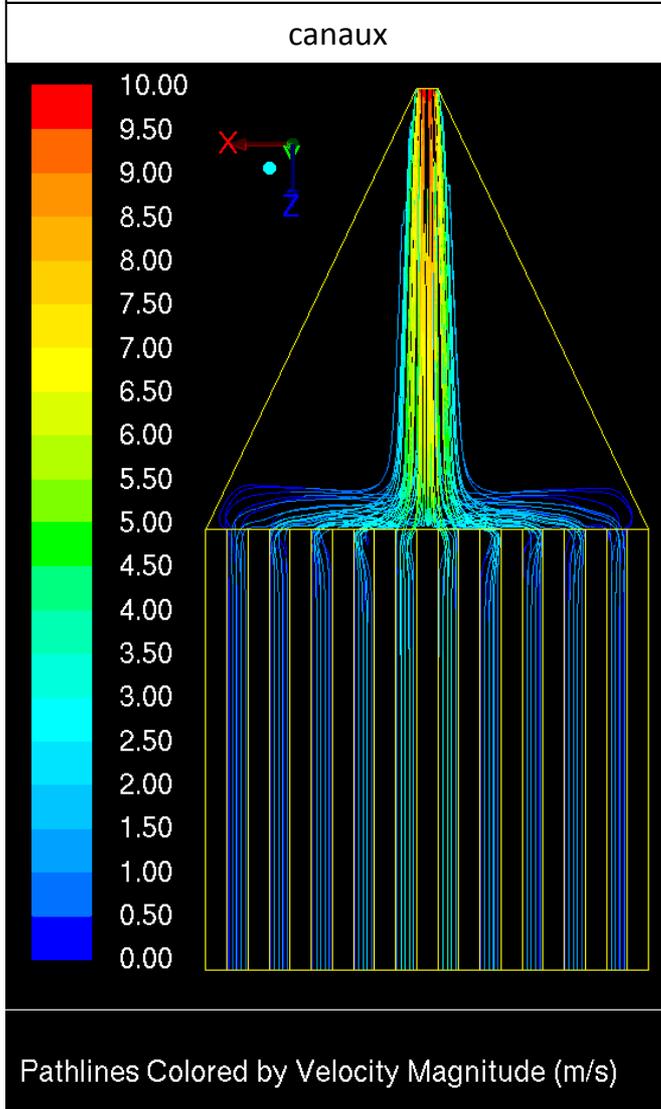
$$\varepsilon = 10/21$$

$$R_x = R_p$$

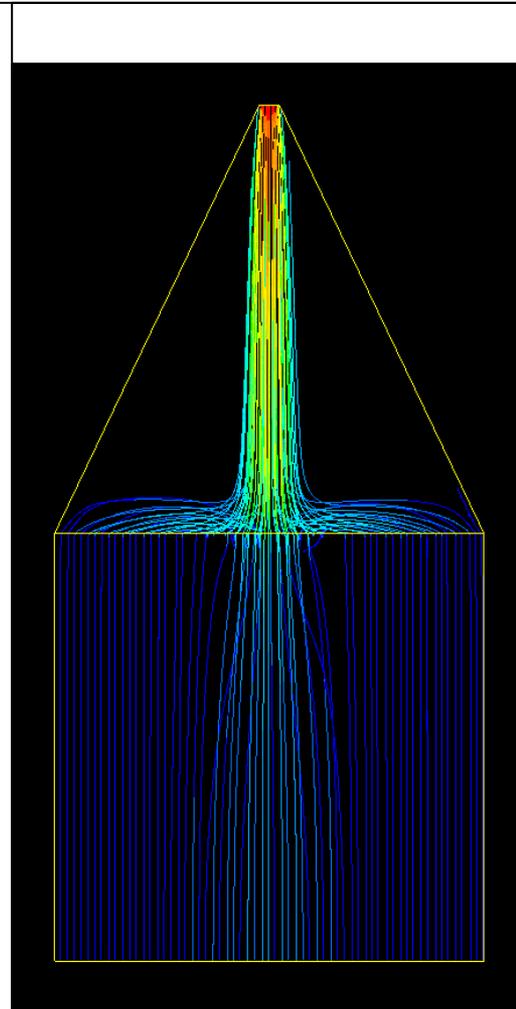


# Echangeur air-air à courants croisés : lignes de courant

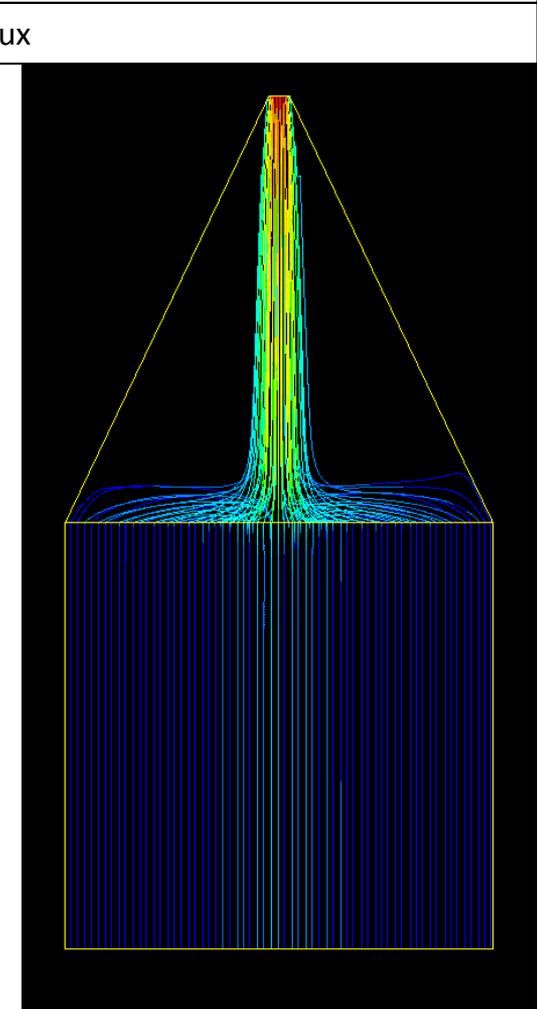
Plan de symétrie xOz (plan milieu des canaux froids)



**« mauvais » distributeur**



$R_x = 100 R_z$   
**trop faible**  
(dispersion transversale)

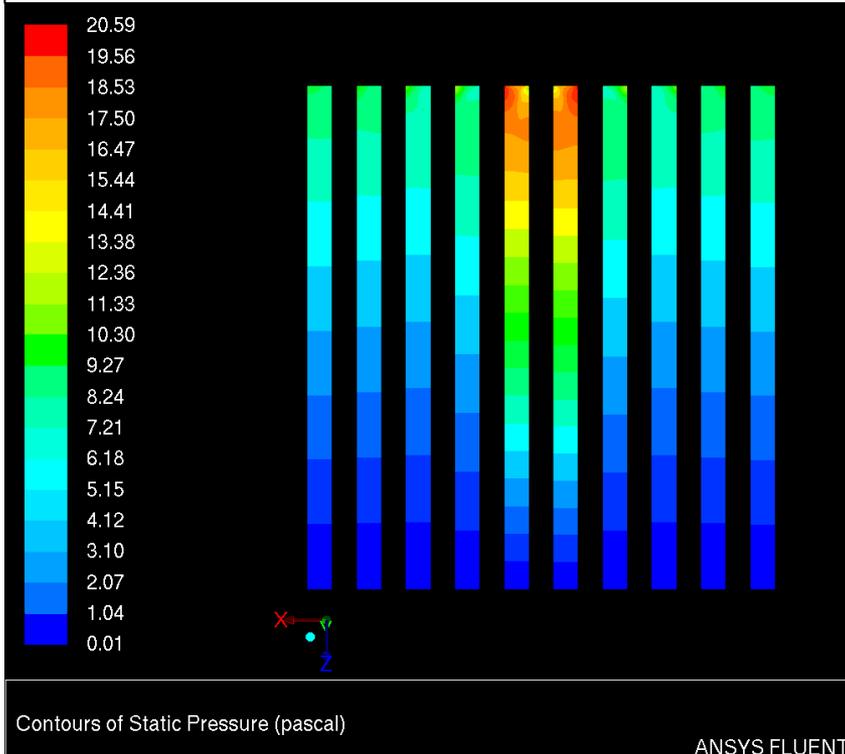


$R_x = 10^5 R_z$

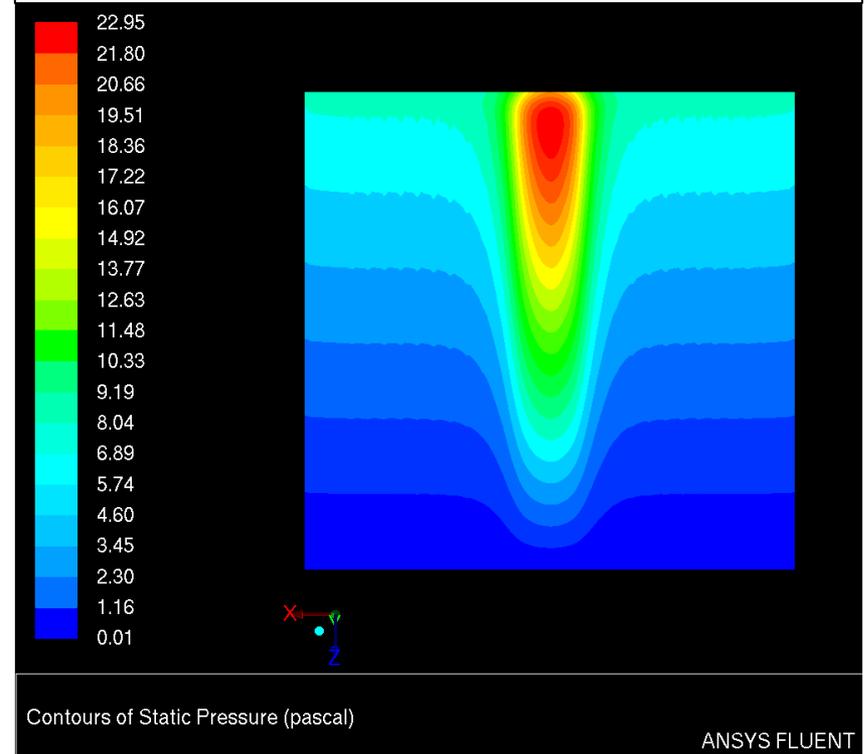
## Echangeur air-air à courants croisés : pression statique

Plan de symétrie xOz (plan milieu des canaux froids)

canaux



poreux

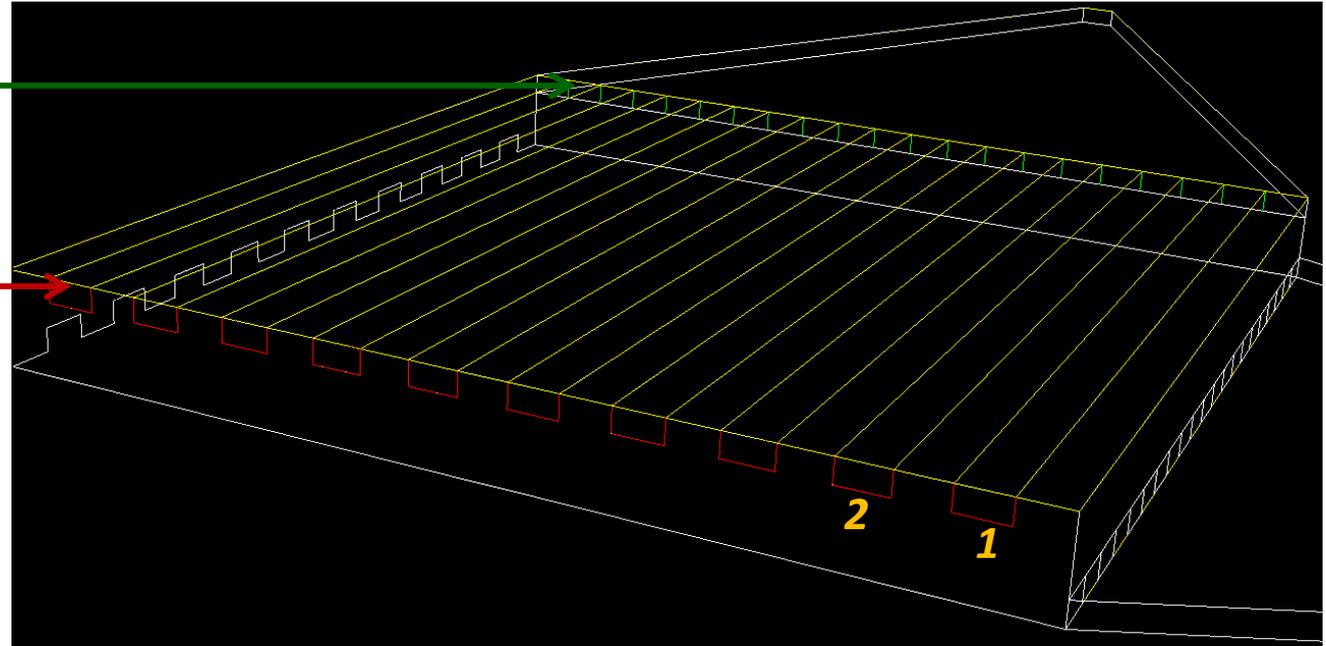


*Cartes de pression statique semblables  
⇒ maldistribution équivalente ?*

## Echangeur air-air à courants croisés : débits massiques

**Entrées 1 à 10**

**Sorties 1 à 10**

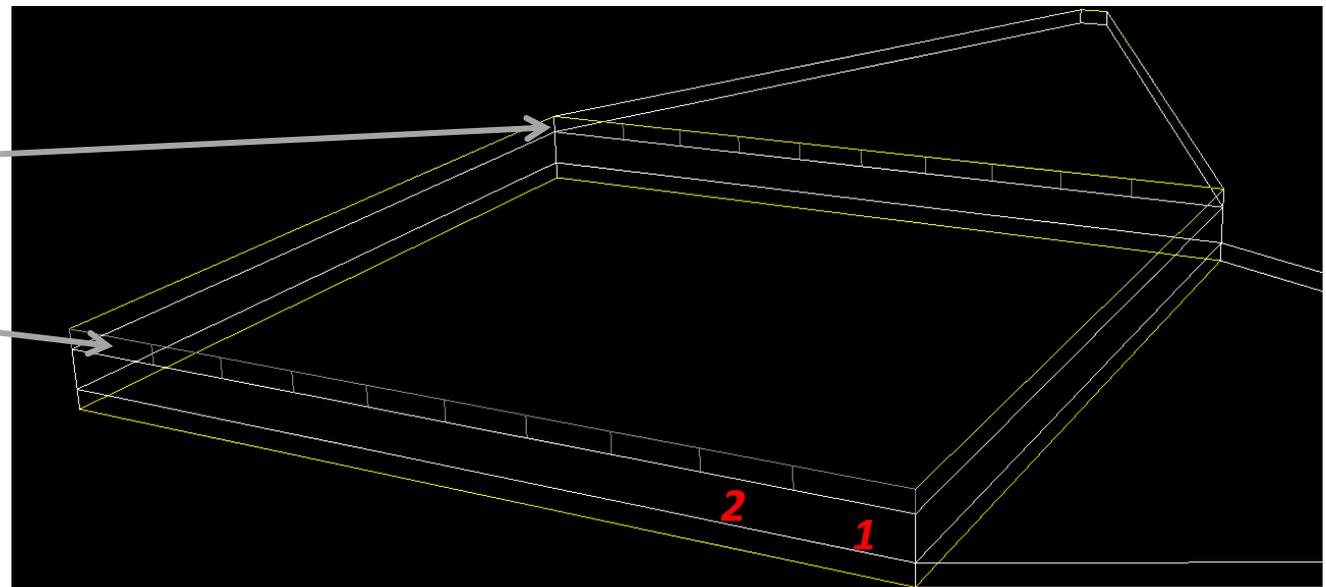


**« Entrées poreux »  
1 à 10**

**« Sorties poreux »  
1 à 10**

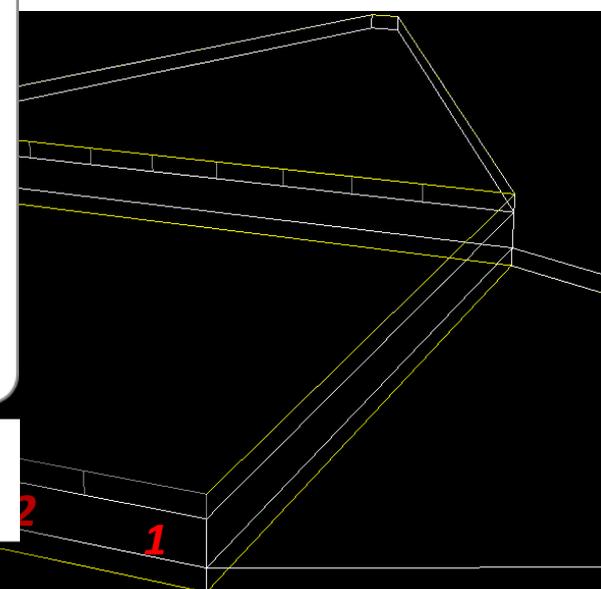
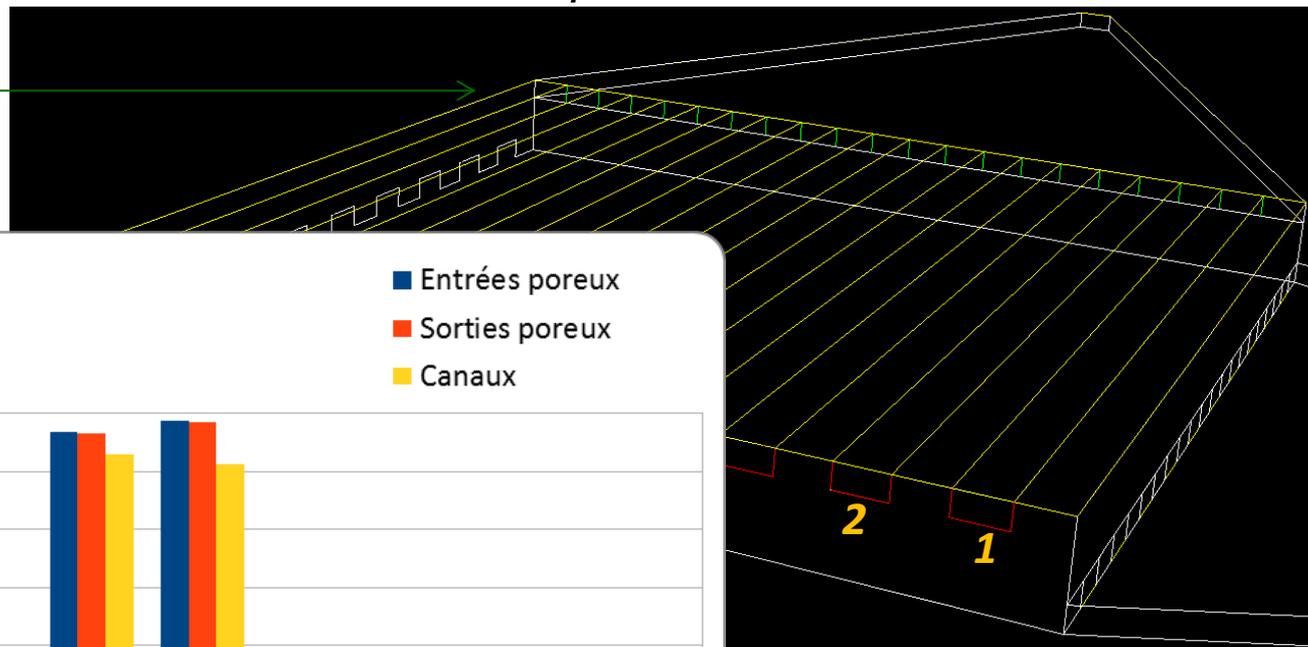
**« sorties » 1 et 10**

**surdimensionnées (+25%)**



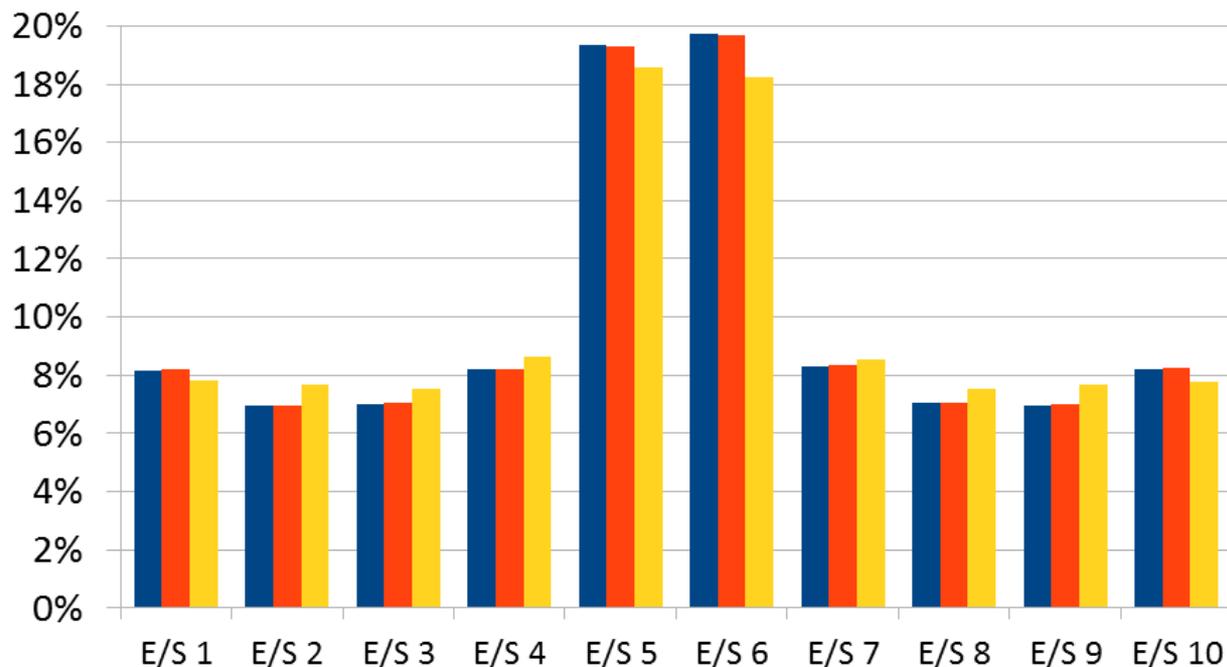
## Echangeur air-air à courants croisés : débits massiques

Entrées 1 à 10



Rapport

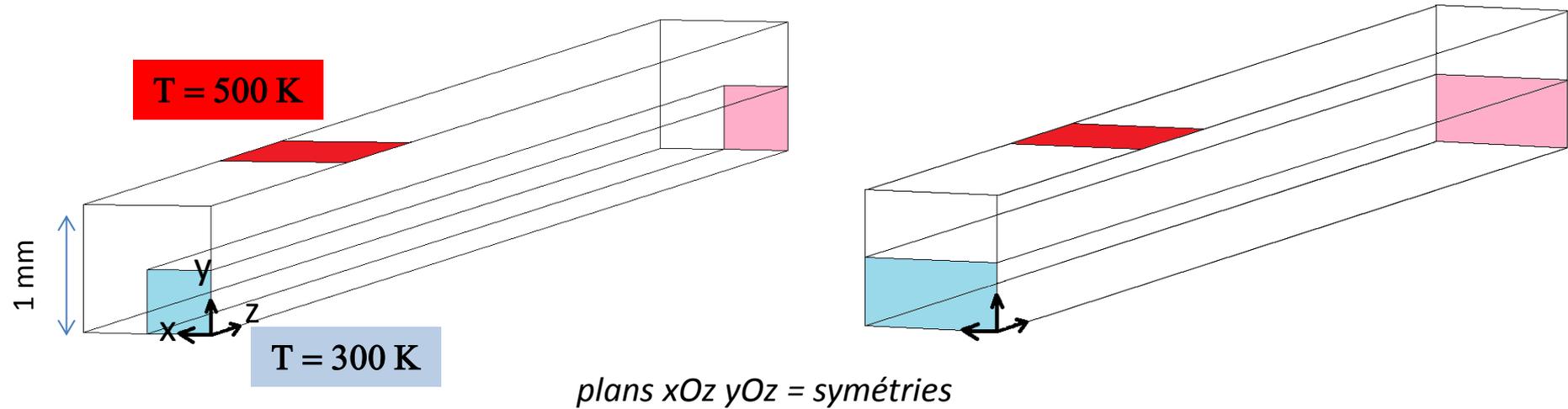
$Q_i/Q_T$



**Symétrie non respectée ?  $\Rightarrow$  profil de vitesse à l'entrée à affiner**  
**Maldistribution correctement modélisée (écarts < 10%)**

## Conductibilité thermique équivalente du milieu poreux

### Simulation sur un canal



Fluide = air

$\lambda_f = 0,0242 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

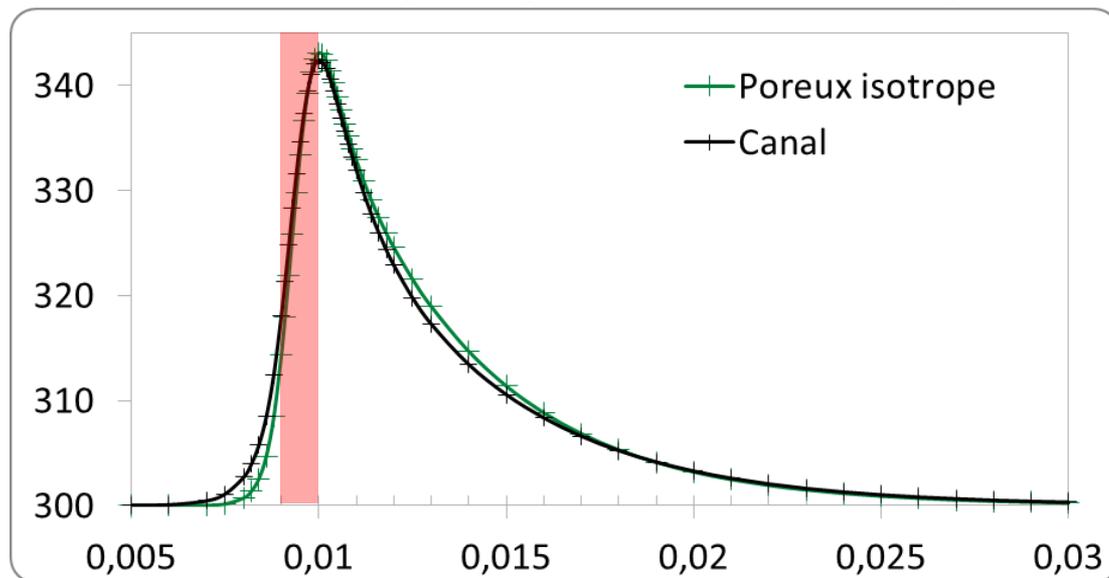
Solide = aluminium

$\lambda_s = 202,4 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$

### Evolution de $T_{\text{moy}}$ (pondérée par le débit massique) suivant Oz

Recherche de la conductibilité thermique équivalente ( $\lambda_p$ ) permettant d'obtenir un profil de température identique (minimisation de la somme des carrés des écarts)

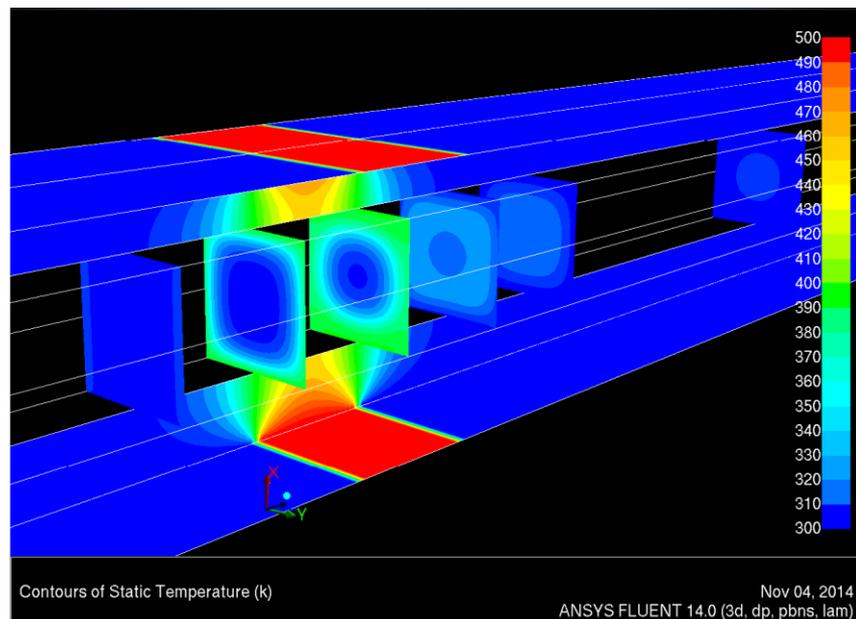
## Conductibilité thermique équivalente du milieu poreux



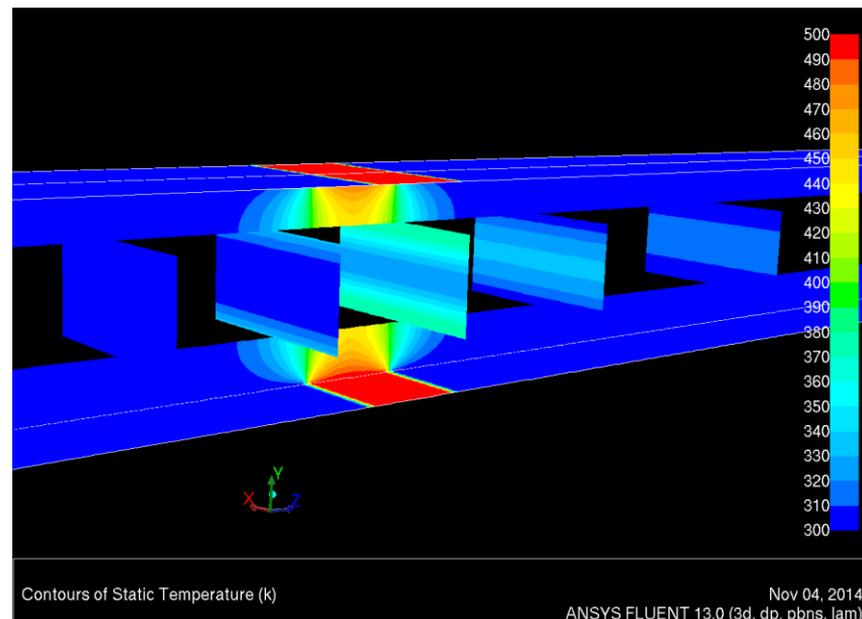
*Zone poreuse Fluent  
(milieu //)*

$$\lambda_p = \varepsilon \lambda_f + (1-\varepsilon) \lambda_s$$

*Solide poreux  
≠ aluminium*

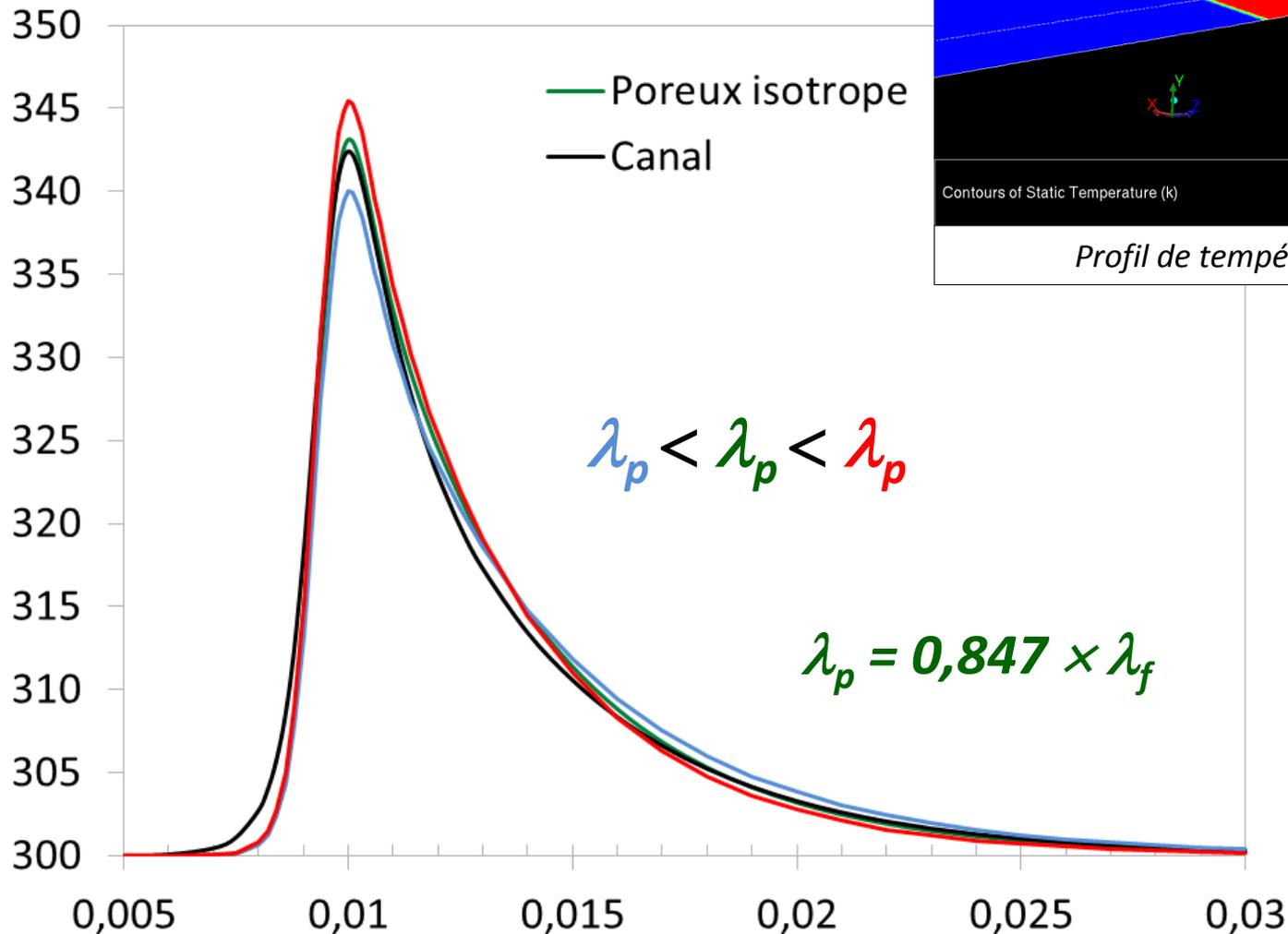
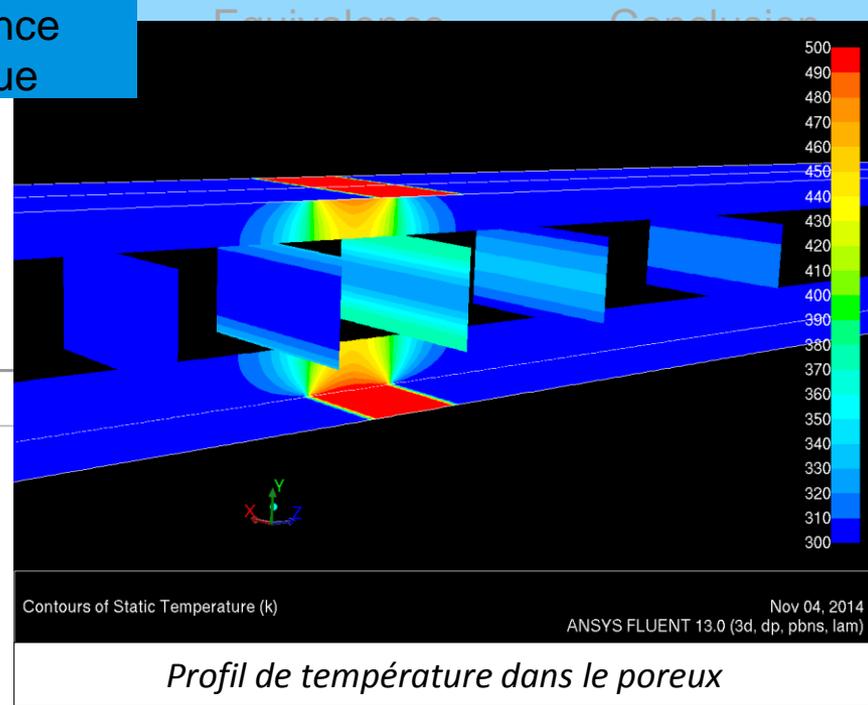


*Profil de température dans le canal*



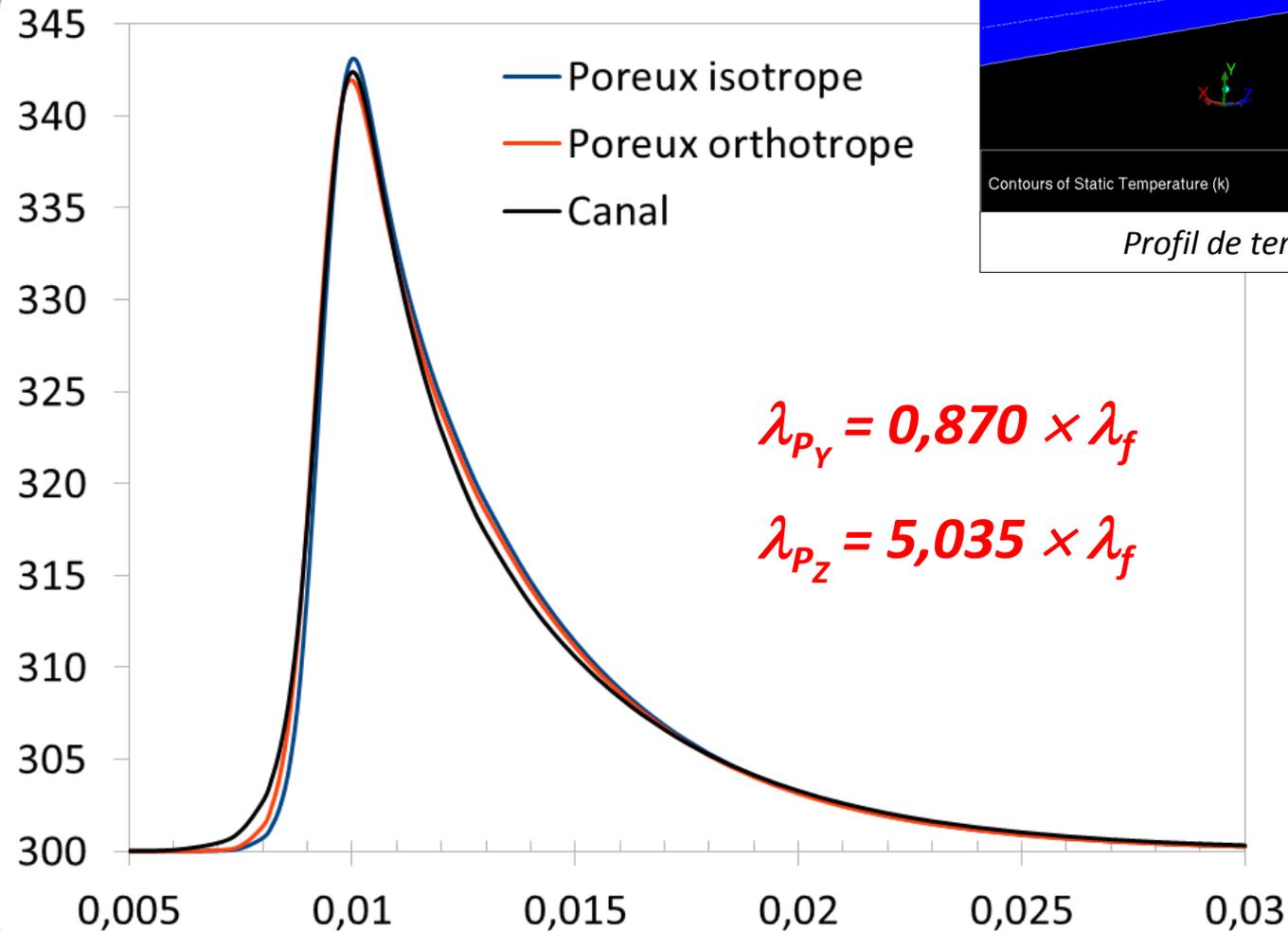
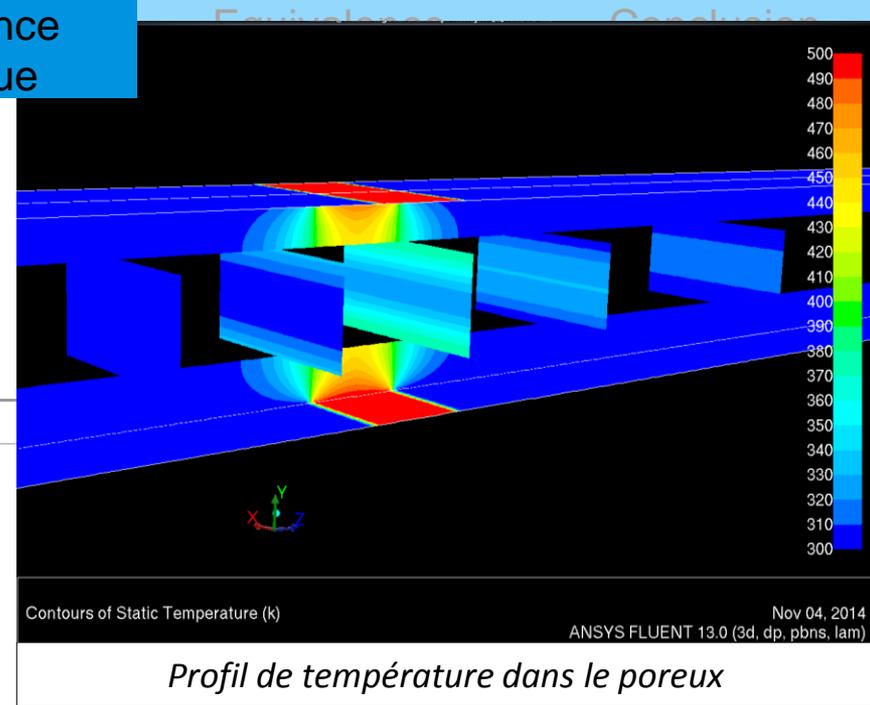
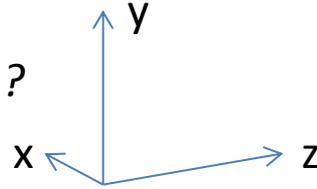
*Profil de température dans le poreux*

# Conductibilité thermique équivalente du milieu poreux



# Conductibilité thermique équivalente du milieu poreux

Poreux orthotrope ?



$$\lambda_{p_y} = 0,870 \times \lambda_f$$

$$\lambda_{p_z} = 5,035 \times \lambda_f$$

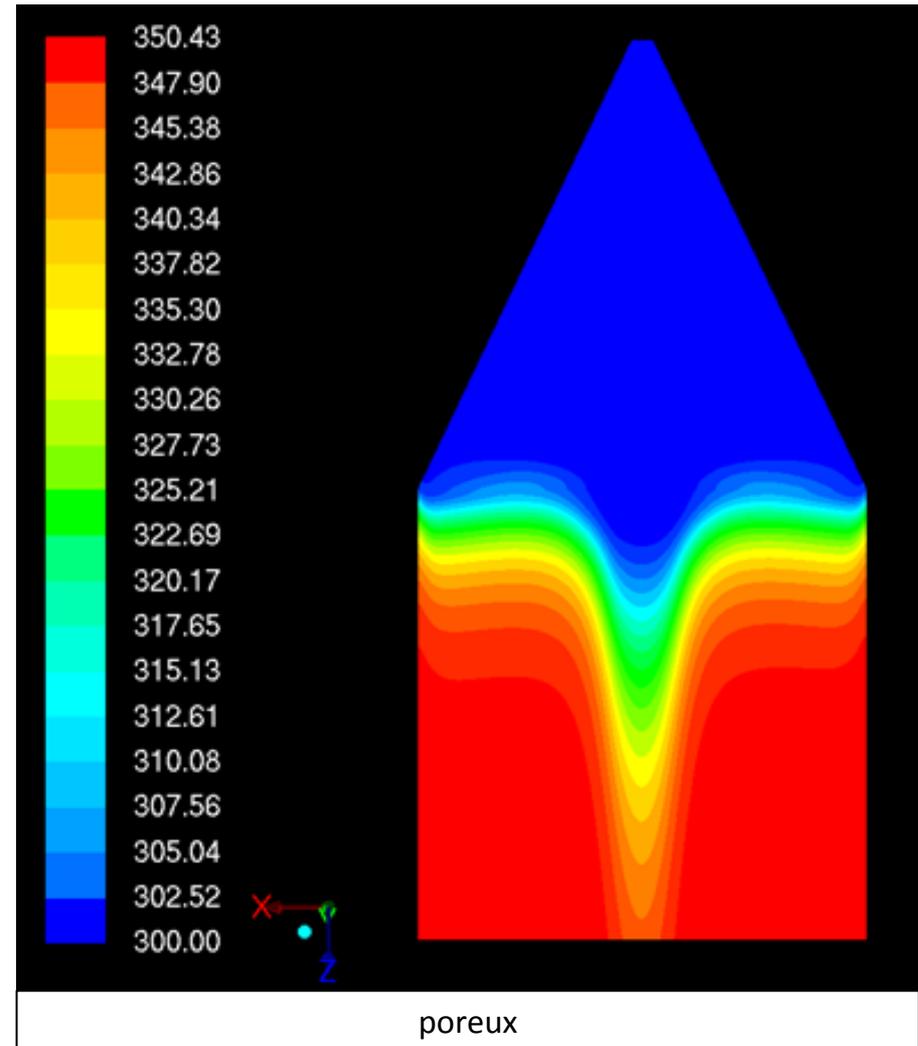
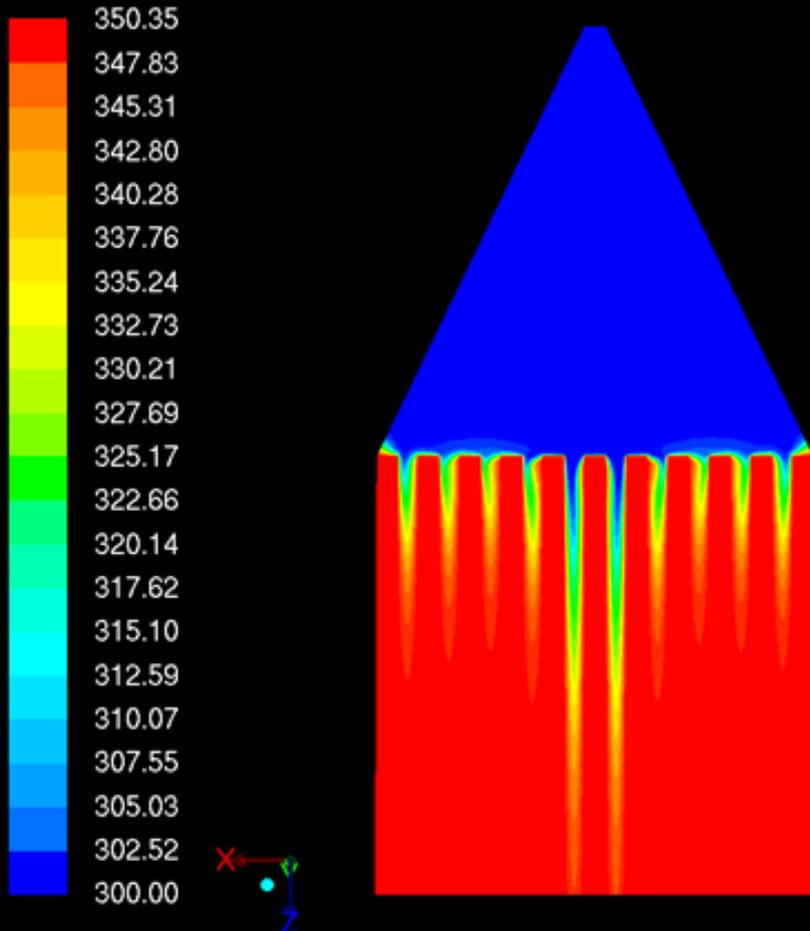
**Recherche des 3  $\lambda_i$  complexe**

⇒ risque de rendre le modèle simplifié trop compliqué à mettre en œuvre...

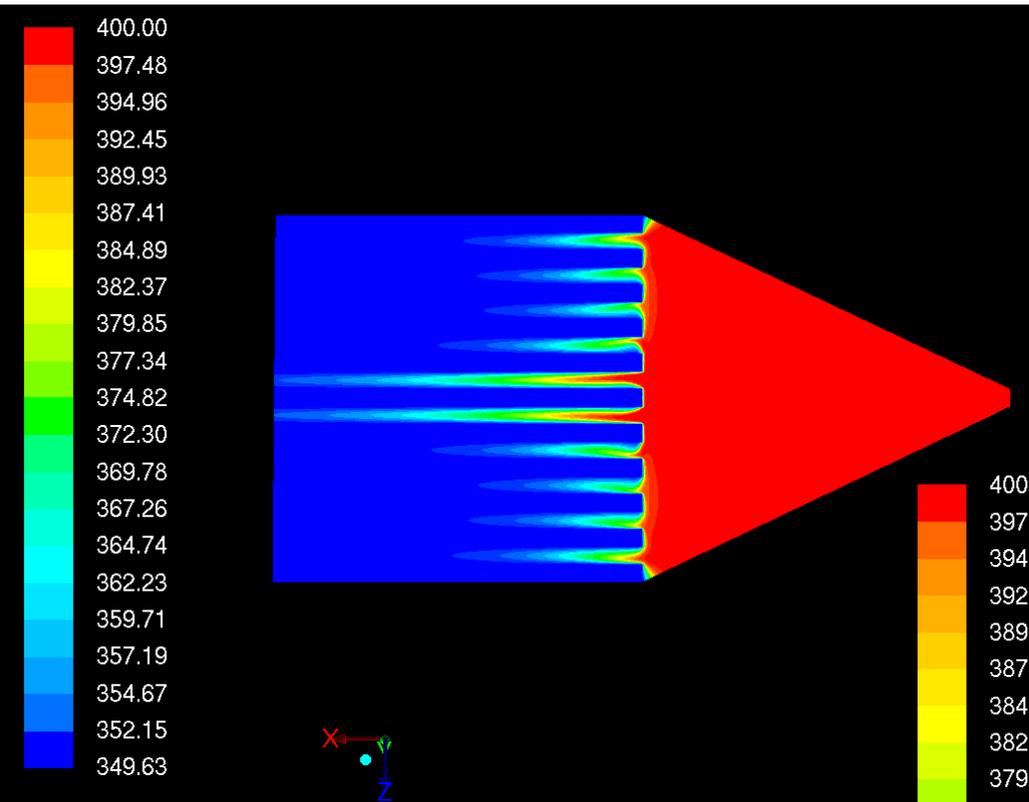
# Echangeur air-air à courants croisés : profils de température

Plan de symétrie xOz  
(plan milieu des canaux froids)

canaux



# Echangeur air-air à courants croisés : profils de température



canaux

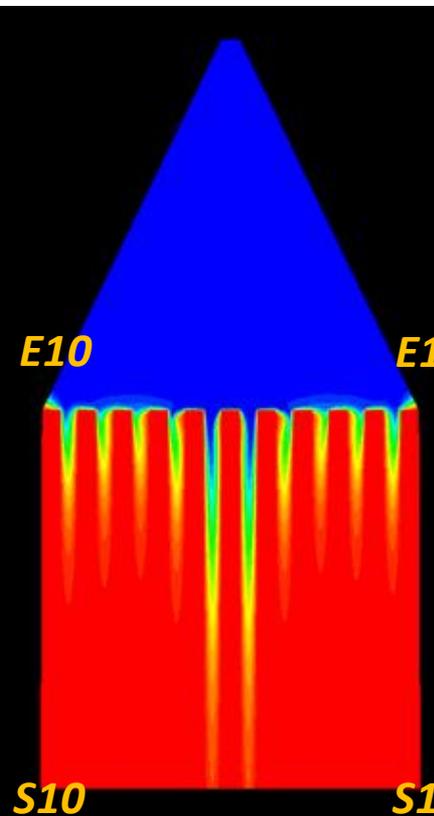
Plan de symétrie xOz  
(plan milieu des canaux **chauds**)

poreux



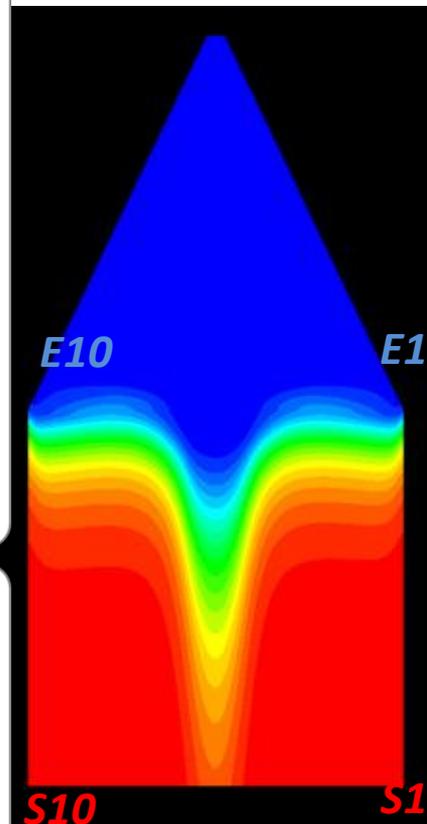
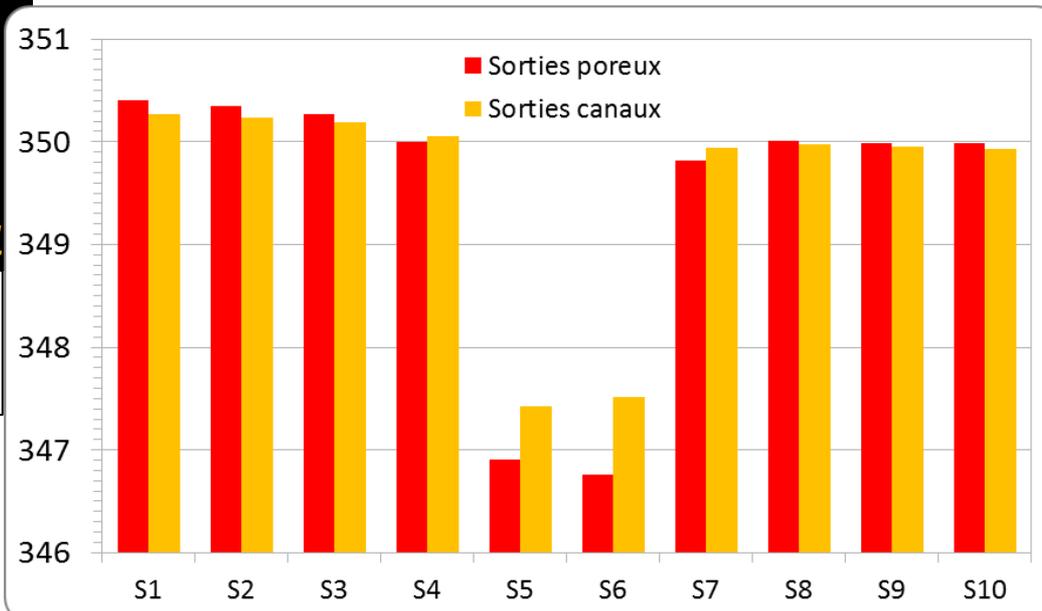
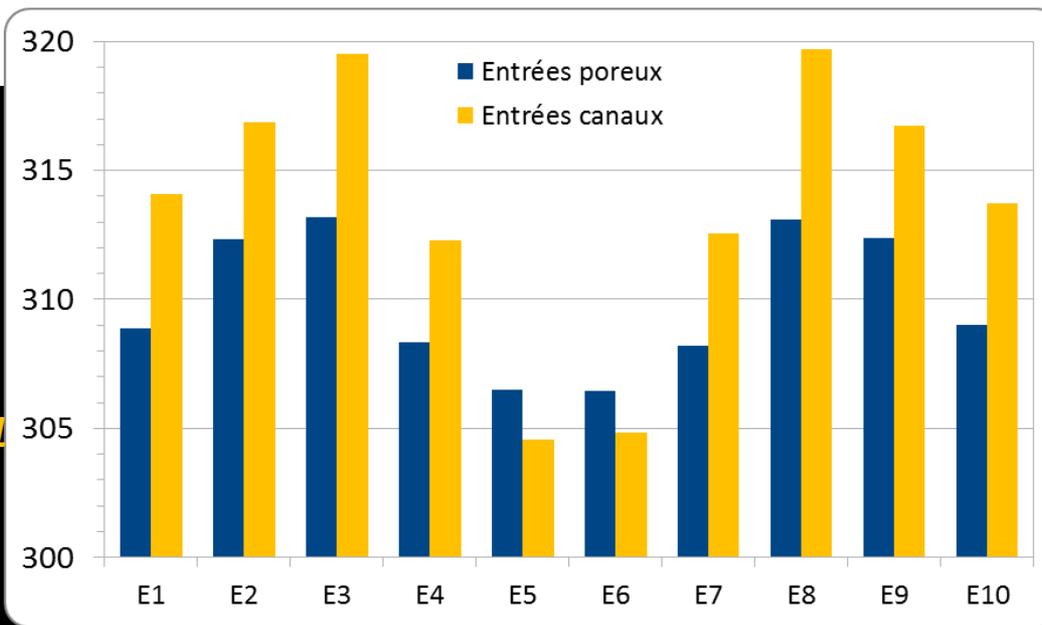
*Cartes de température  
semblables  
⇒ maldistribution thermique  
équivalente ?*

# Echangeur air-air à courants croisés : température moyenne en entrées / sorties



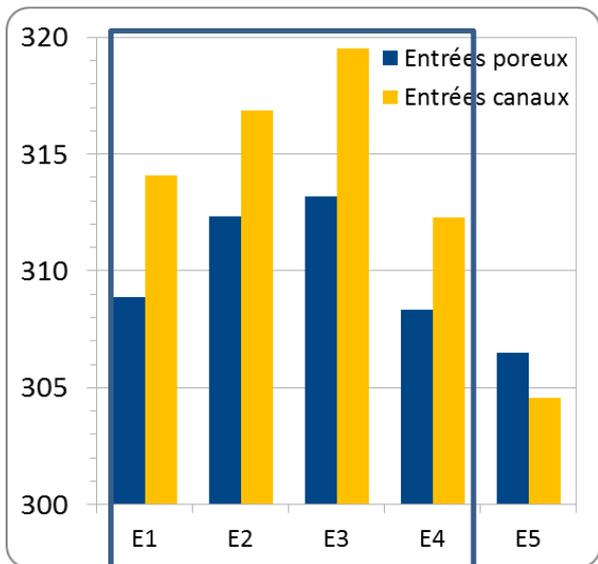
Plan de symétrie xOz  
(plan milieu des canaux  
froids)

**Maldistribution en  
sortie bien  
modélisée.**

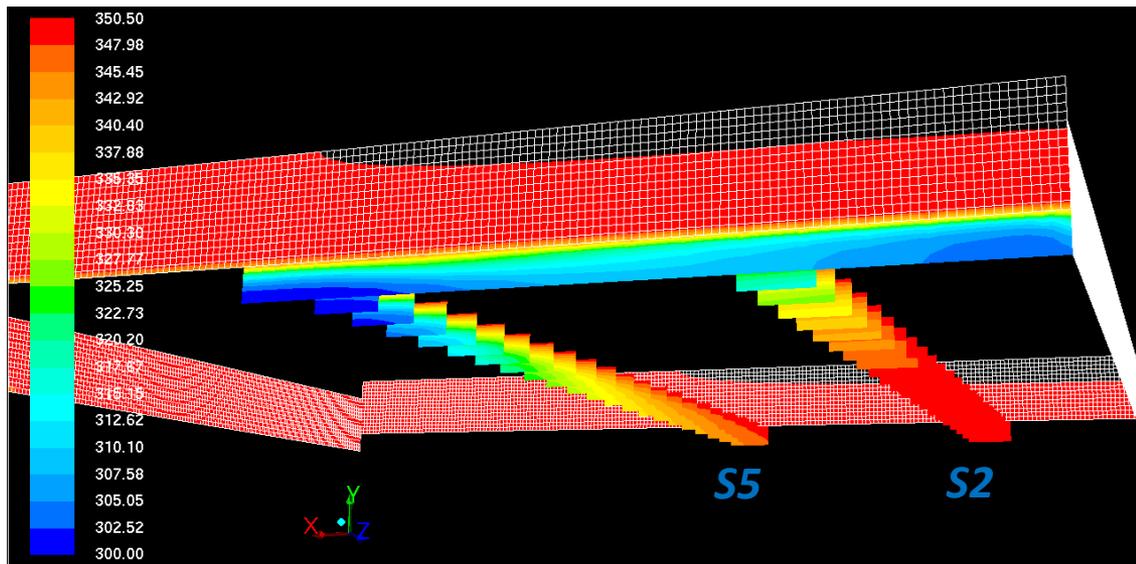
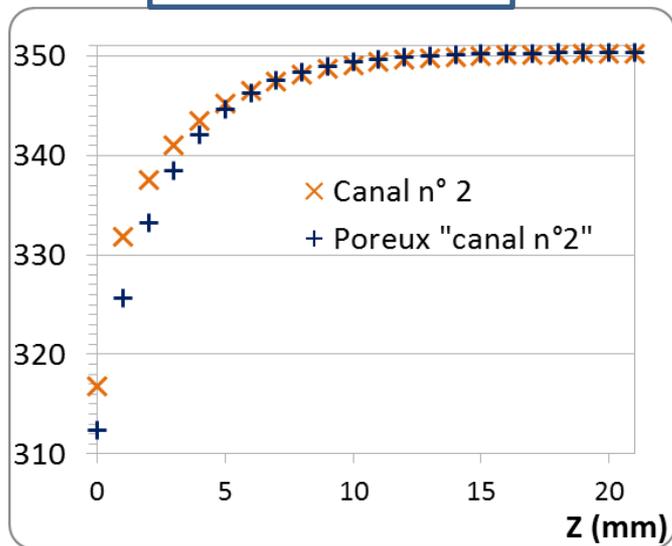


*Cohérence avec les  
débits et le  
fonctionnement  
contre-courant.*

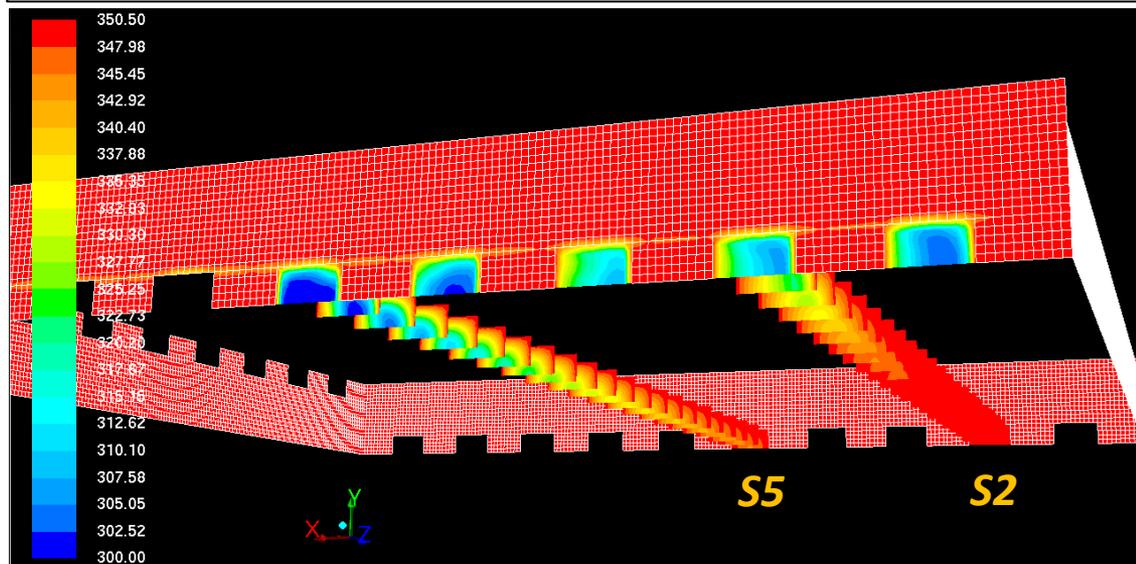
# Echangeur air-air à courants croisés : température d'entrées des canaux froids ?



Effets de parois (cf. mono canal)

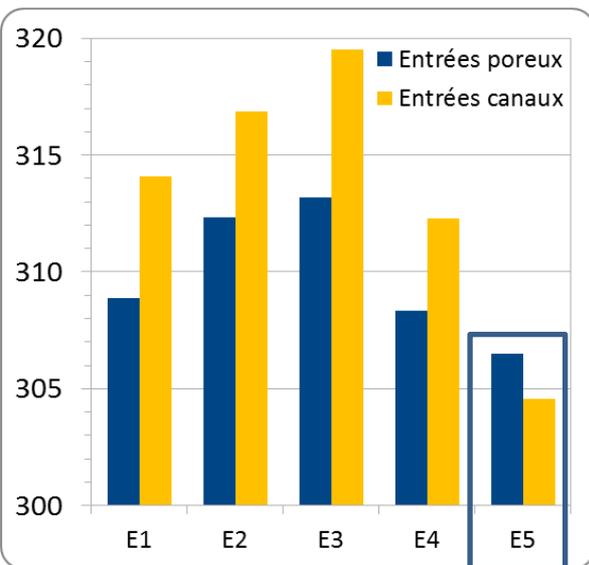


Poreux : température le long des « canaux » 2 et 5

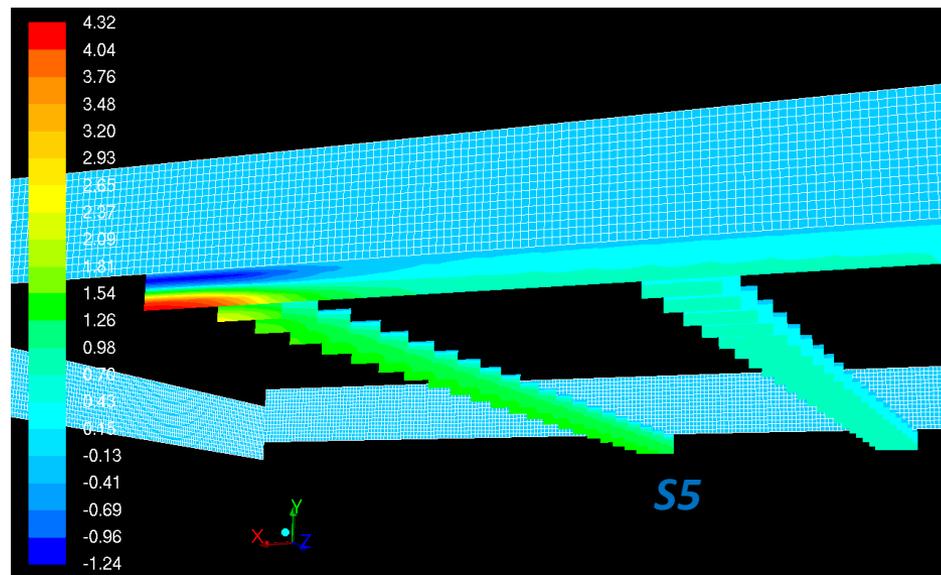


Canaux : température le long des canaux 2 et 5

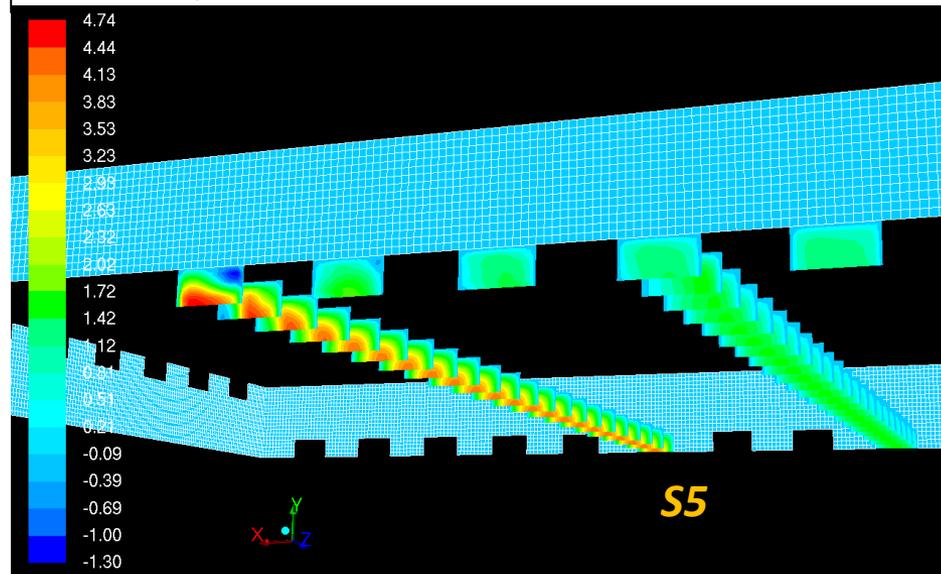
# Echangeur air-air à courants croisés : température d'entrées des canaux froids ?



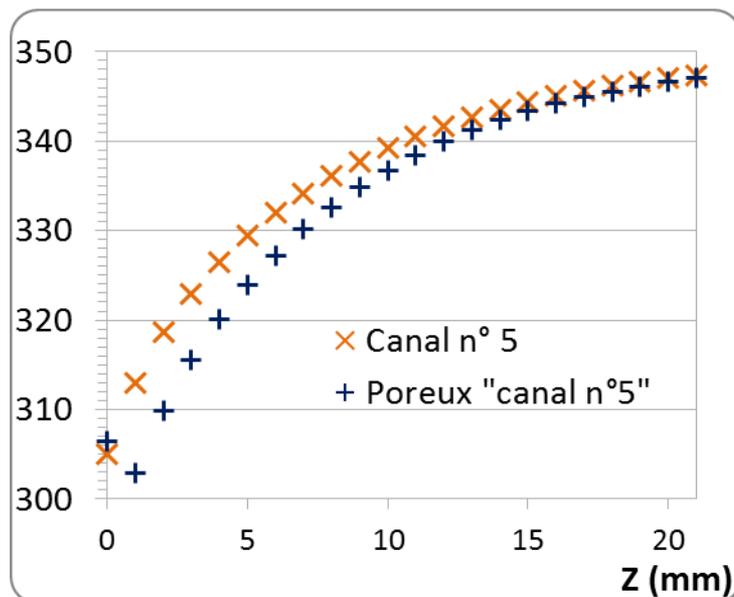
*Effet de retro mélange plus marqué à l'entrée du milieu poreux ( $\Rightarrow R_x$  trop élevée)*



Poreux : profil de vitesse selon Z à l'entrée des « canaux »

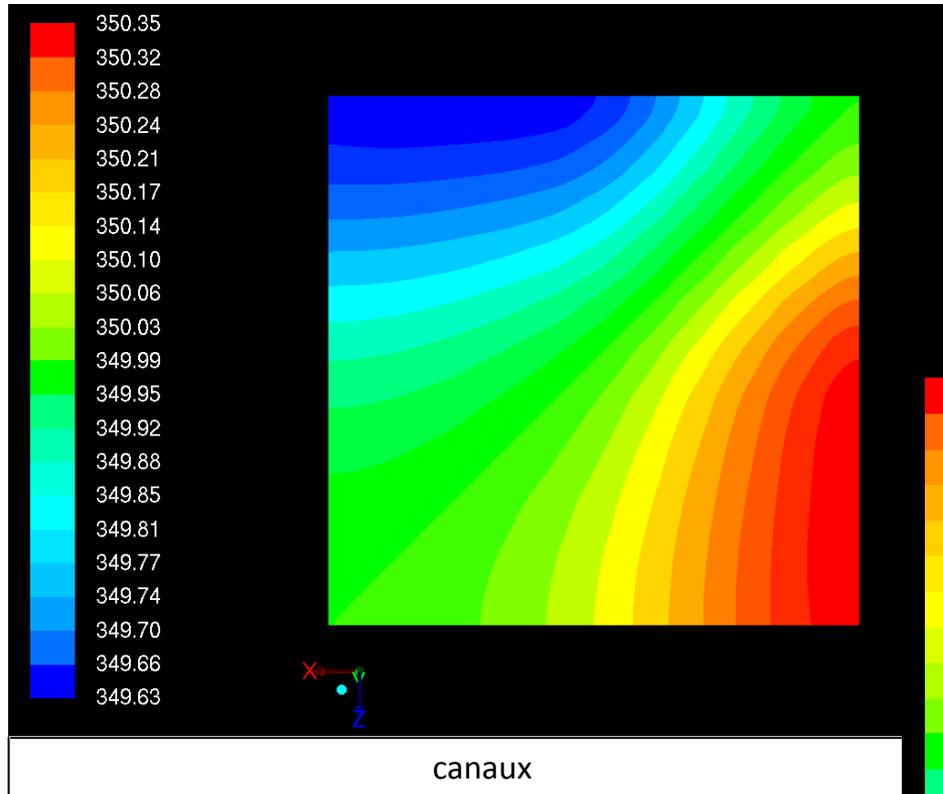


Canaux : profil de vitesse selon Z à l'entrée des canaux

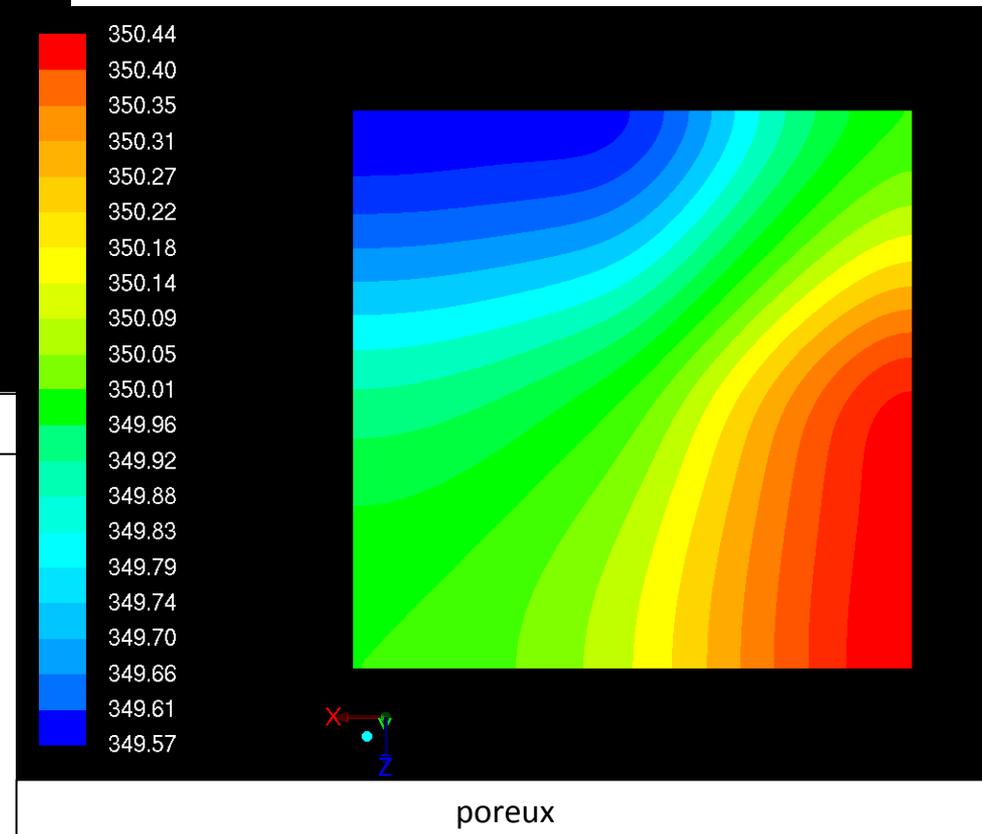


*Effet dû au mauvais distributeur.*

## Echangeur air-air à courants croisés : profils de température



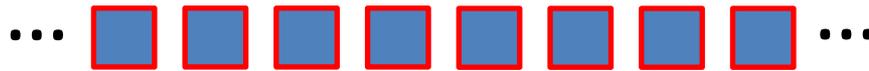
Plan xOz au milieu de la paroi  
métallique



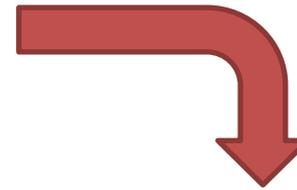
Cartes de température  
semblables  
⇒  $\Delta T$  surestimée (20%)

*Correction surfacique ou volumique*

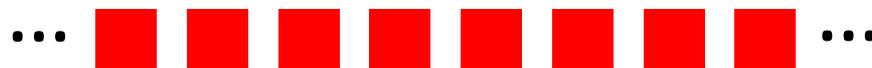
## Réaction hétérogène en paroi



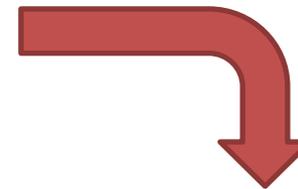
*Correction des  
constantes cinétiques  
suivant le rapport des  
surfaces*



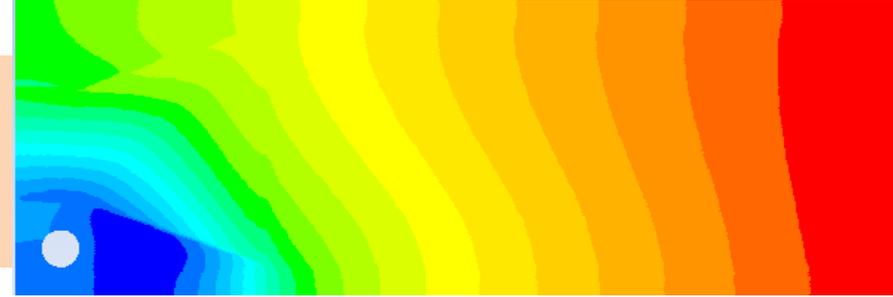
## Réaction homogène



*Correction des  
constantes cinétiques  
suivant la valeur de  $\varepsilon$*



Méthode utilisée sur un réacteur catalytique de conversion de méthane en hydrogène



Méthode facilitant l'étude de l'effet de la forme et du nombre de canaux : géométrie « poreuse » identique /  $R_p$  et  $\lambda_{eq}$  différents

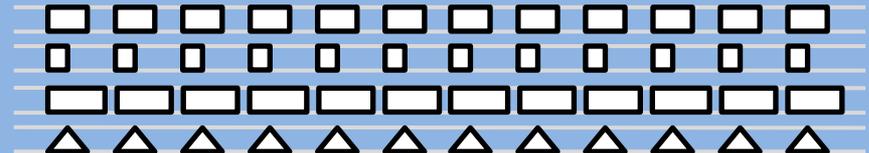
Méthode applicable pour des études hydrodynamiques sur des procédés avec des forts changements d'échelles (réseaux multitubulaires)

Estimation du gain en nombre de mailles et temps de calcul (vers une simulation d'un module complet ?)

Canaux obstrués : modélisation par un profil géométrique de  $R_p$

Développement d'un outil de calcul pour estimer  $R_p$  et  $\lambda_{eq}$  en fonction de :

- la géométrie des canaux
- la nature des matériaux
- l'épaisseur des parois



# Simulation de réacteurs multicanaux compacts : utilisation de zones poreuses équivalentes

---

**Merci.**

*ghislain.genin@univ-lorraine.fr*

