



SOCIETE FRANÇAISE DE THERMIQUE

Groupe «Milieux hétérogènes et Transferts»

Jeudi 25 Novembre 2010 à 9h00

(Accueil à partir de 8h)

au

CTIF 44 avenue de la Division Leclerc
F-92318 SEVRES CEDEX

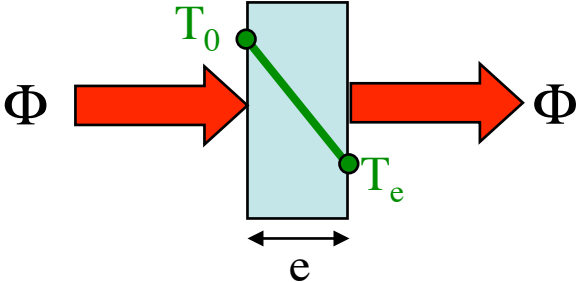
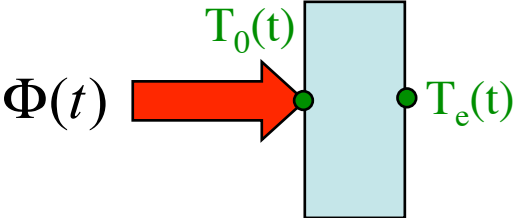
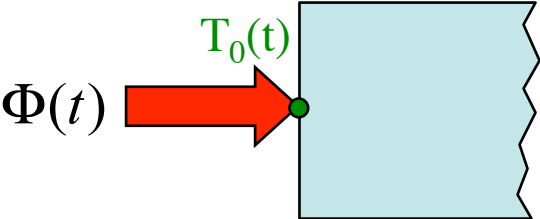
*"Mousses métalliques, Applications en échangeurs
thermiques et réacteurs."*

Propriétés thermo-physiques et d'écoulement des mousses métalliques : mesures & difficultés.

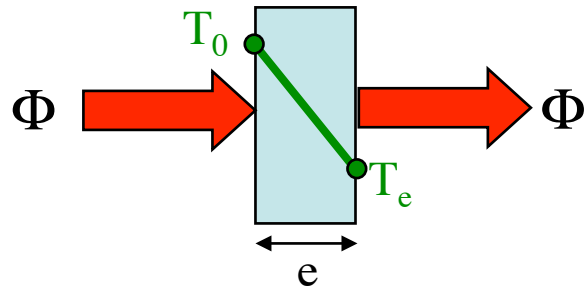
F. Topin, J.M. Hugo, F. Rigollet, J.L. Gardarein
(Polytech'marseille / IUSTI UMR CNRS 6595, Marseille)

La conductivité thermique : mesure toujours indirecte

Illustration en situation 1D, milieu homogène

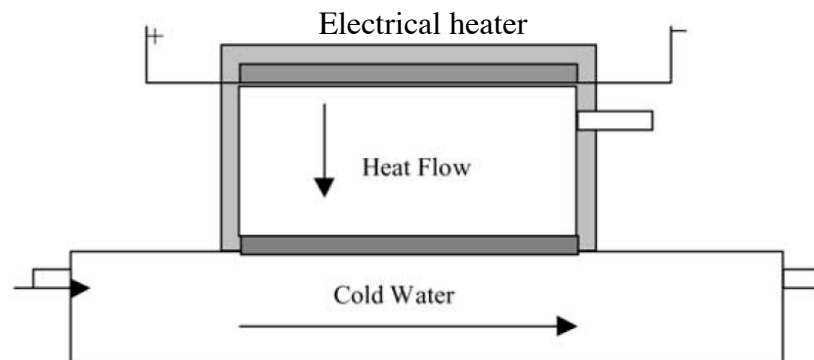
Méthode 'générique'	Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer k
<p>I - Stationnaire, milieu d'épaisseur finie</p> 	<p>Résistance thermique (K/W)</p> $R_{th} = \frac{e}{k} = \frac{T_0 - T_e}{\Phi}$ <p>k = conductivité thermique en $Wm^{-1}K^{-1}$</p>	<p>- Épaisseur e</p> $k = \frac{e}{R_{th}}$
<p>II - Instationnaire, milieu d'épaisseur finie</p> 	<p>Temps diffusif (s)</p> $t_{diff} = \frac{e^2}{a}$ <p>avec $a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \left(\frac{k}{b}\right)^2$</p> <p>$a$ = diffusivité thermique en m^2/s</p>	<p>- Épaisseur e</p> <p>- Capacité calorifique volumique $\rho \cdot C_p$ ou effusivité thermique b</p> $k = \frac{\rho \cdot C_p}{t_{diff}} e^2 \quad \text{ou} \quad k = \sqrt{\frac{b}{t_{diff}}} e$
<p>III - Instationnaire, milieu semi-infini</p> 	$\beta = \frac{\Phi}{b} \quad (m^2 K s^{-1/2})$ <p>avec $b = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{k}{\sqrt{a}}$</p> <p>$b$ = effusivité thermique en $Wm^{-2}K^{-1}s^{1/2}$</p>	<p>- Capacité calorifique volumique $\rho \cdot C_p$ ou diffusivité thermique a</p> <p>- Flux $\Phi(t)$</p> $k = \left(\frac{\Phi}{\beta}\right)^2 \frac{1}{\sqrt{\rho \cdot C_p}} \quad \text{ou} \quad k = \frac{\Phi}{\beta} \sqrt{a}$

Méthode stationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Conductivimétrie'



Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer k
<p>Résistance thermique (K/W)</p> $R_{th} = \frac{e}{k} = \frac{T_0 - T_e}{\Phi}$ <p>k = conductivité thermique en $Wm^{-1}K^{-1}$</p>	<p>- Épaisseur e</p> $k = \frac{e}{R_{th}}$

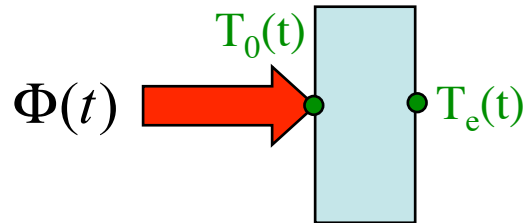
- **Classe de méthode** : 'PLAQUE CHAUDE'
- **Modèle simple** : loi de Fourier
- **Identification** de la conductivité **simple** : directe par la loi de Fourier
- **Expérience difficile** :
 - garantir un transfert 1D : plaque chaude gardée (isolation latérale)
 - atteindre l'état stationnaire
 - mesurer précisément 3 grandeurs : T_0 , T_e et Φ (le plus difficile)



Exemple de montage de ce type utilisé pour des mousses d'aluminium, dans :

Thermophysical properties of high porosity metal foams, A. Bhattacharya et al, Int. J. Heat and Mass Transf., 45 (2002)

Méthode instationnaire, milieu d'épaisseur finie : 'Diffusivimétrie'

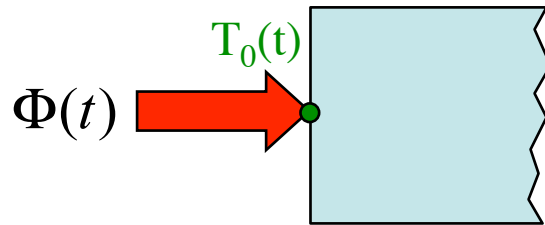


Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer k
<p>Temps diffusif (s) $t_{diff} = \frac{e^2}{a}$</p> <p>avec $a = \frac{k}{\rho \cdot C_p} = \left(\frac{k}{b}\right)^2$</p> <p>$a$ = diffusivité thermique en m^2/s</p>	<p>- Épaisseur e</p> <p>- Capacité calorifique volumique $\rho \cdot C_p$ ou effusivité thermique b</p> <p>$k = \frac{\rho \cdot C_p}{t_{diff}} e^2$ ou $k = \sqrt{\frac{b}{t_{diff}}} e$</p>

- **Classe de méthode** :
 - 'Flash' (excitation = Dirac de flux)
 - 'Step Heating' (excitation = Créneau de flux)
- **Modèle moins simple** : équation de la chaleur instationnaire 1D
- **Identification** de la conductivité **moins simple** : problème d'estimation non-linéaire de plusieurs paramètres (minimisation moindre carrés mesures-modèle). Identification **préliminaire de la diffusivité**
- **Expérience moins difficile** :
 - garantir un transfert 1D : excitation uniforme et pas de pertes latérales
 - mesure seulement d'un thermogramme ($T(t)$ en face arrière ou avant)
 - la mesure du flux absorbé est inutile, il fait partie des paramètres estimés

Application de cette méthode (Step Heating, mesure en face arrière)
à des mousses d'aluminium, développée dans la suite

Méthode instationnaire, milieu semi-infini : 'Effusivimétrie'



Paramètre majeur identifié	Mesure complémentaire indispensable pour calculer k
$\beta = \frac{\Phi}{b} \quad (m^2 K s^{-1/2})$ <p>avec $b = \sqrt{k \cdot \rho \cdot C_p} = \frac{k}{\sqrt{a}}$</p> <p>$b =$ effusivité thermique en $W m^{-2} K^{-1} s^{1/2}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité calorifique volumique $\rho \cdot C_p$ ou diffusivité thermique a - Flux $\Phi(t)$ $k = \left(\frac{\Phi}{\beta} \right)^2 \frac{1}{\rho \cdot C_p} \quad \text{ou} \quad k = \frac{\Phi}{\beta} \sqrt{a}$

- **Classe de méthode** : 'Sondes planes' de type 'Plan chaud'
- **Modèle simple** : équation de la chaleur instationnaire 1D

$$- \quad T(t) = \frac{Q}{b} \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi t}} \text{ si flux = Dirac d'énergie } Q \quad \text{et} \quad T(t) = \frac{2\Phi}{b} \cdot \sqrt{\frac{t}{\pi}} \text{ si } \Phi = \text{constante}$$

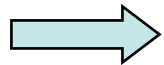
- **Identification** de la conductivité **simple**, identification **préliminaire de l'effusivité**
- **Expérience moins difficile** :
 - garantir un transfert 1D : excitation uniforme et pas de pertes latérales, montage symétrique
 - mesure seulement d'un thermogramme (sur la surface chauffée)
 - si l'expérience se complique (effets 2D notamment, prise en compte de l'inertie de la sonde), le modèle peut évoluer et l'identification pourra porter également sur ces paramètres supplémentaires
- **Il faut connaître le flux entrant dans le matériau pour identifier l'effusivité (souvent effet Joule)**

Mesure de la conductivité thermique : résumé et quelques remarques

Résumé :

- Mesure de conductivité **toujours indirecte** :

- en conductivimétrie : mesure de deux températures et d'un FLUX stationnaires + épaisseur
- en diffusivimétrie : mesure d'un thermogramme + épaisseur + capacité ou effusivité
- en effusivimétrie : mesure d'un thermogramme + FLUX + capacité ou diffusivité



Seule la diffusivimétrie ne nécessite pas de connaître le flux entrant dans le matériau

- Remarques

- Estimation simultanée : en expérience instationnaire (diffusivimétrie ou effusivimétrie), il est possible **d'estimer simultanément la diffusivité et l'effusivité** d'un échantillon inconnu
 - en contact avec un échantillon connu
 - en provoquant des volontairement des transferts 2D (sonde plane plus petite que l'échantillon en effusivimétrie, de type 'ruban chaud' ou 'disque chaud')
- Pour des matériaux hétérogènes : la question de l'**homogénéisation** se pose pour les méthodes instationnaires (par exemple en diffusivimétrie) :

Pour un échantillon hétérogène, on mesure indépendamment :

- Conductivité k (plaque chaude)
- Diffusivité a (flash)
- Capacité Volumique ρC_p (calorimétrie)



Si on vérifie que $a = \frac{k}{\rho \cdot C_p}$

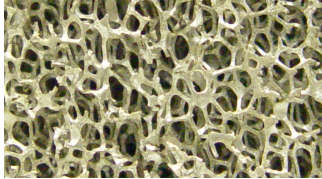
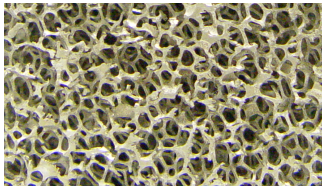
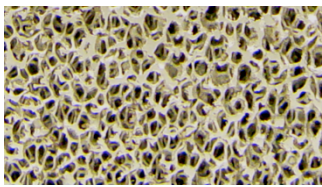
On pourra dire que l'on a un matériau **homogène équivalent** avec ces propriétés



Sinon, n'y a-t-il pas une limite à l'utilisation de la diffusivité mesurée pour en déduire une conductivité?...

Application : Diffusivimétrie (Step heating, mesure face arrière) Sur des mousses d'aluminium ERG

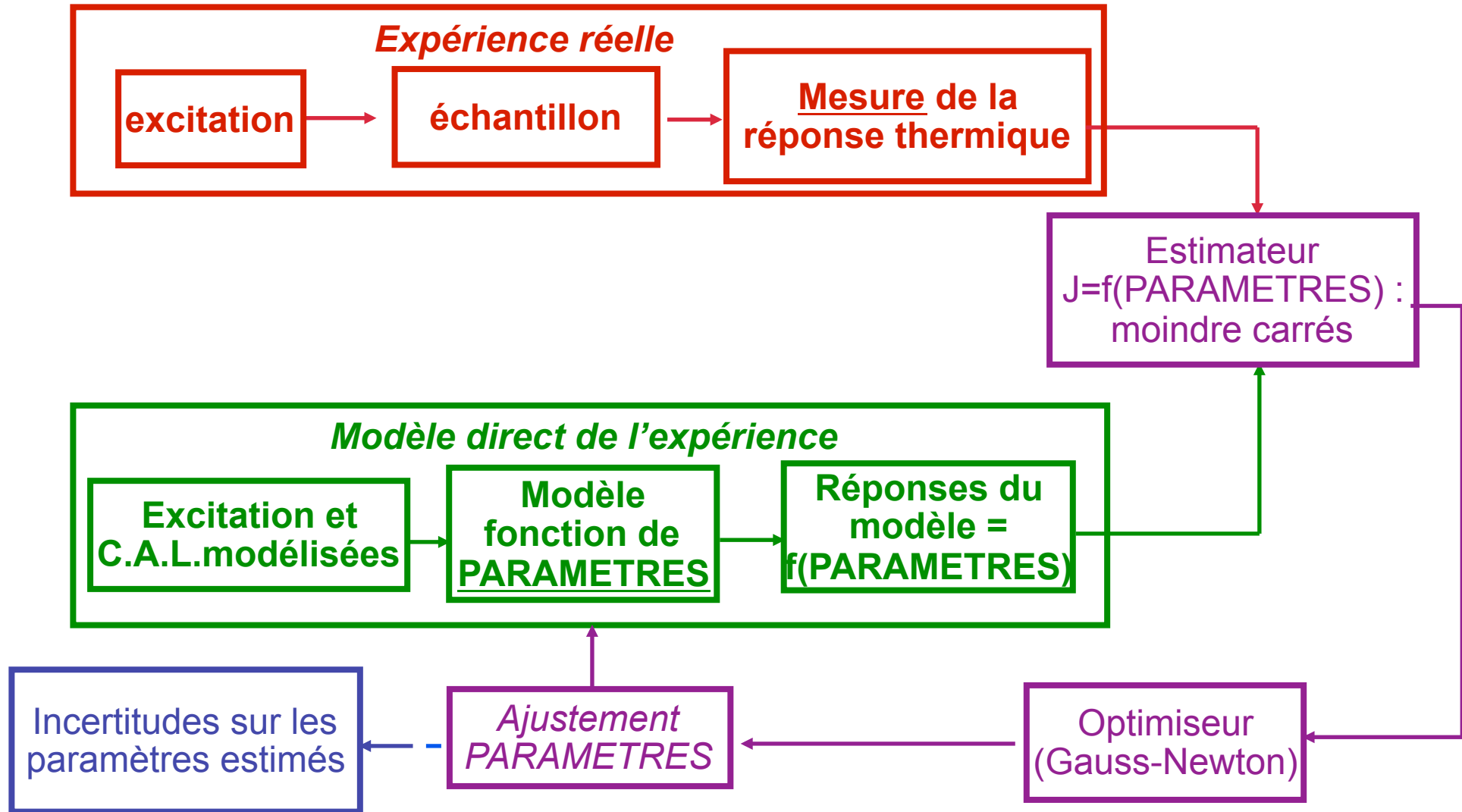
Blocs de 50×50×100mm³

	PPI		Taille moy. pores	r	rC_p	e
	/		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%

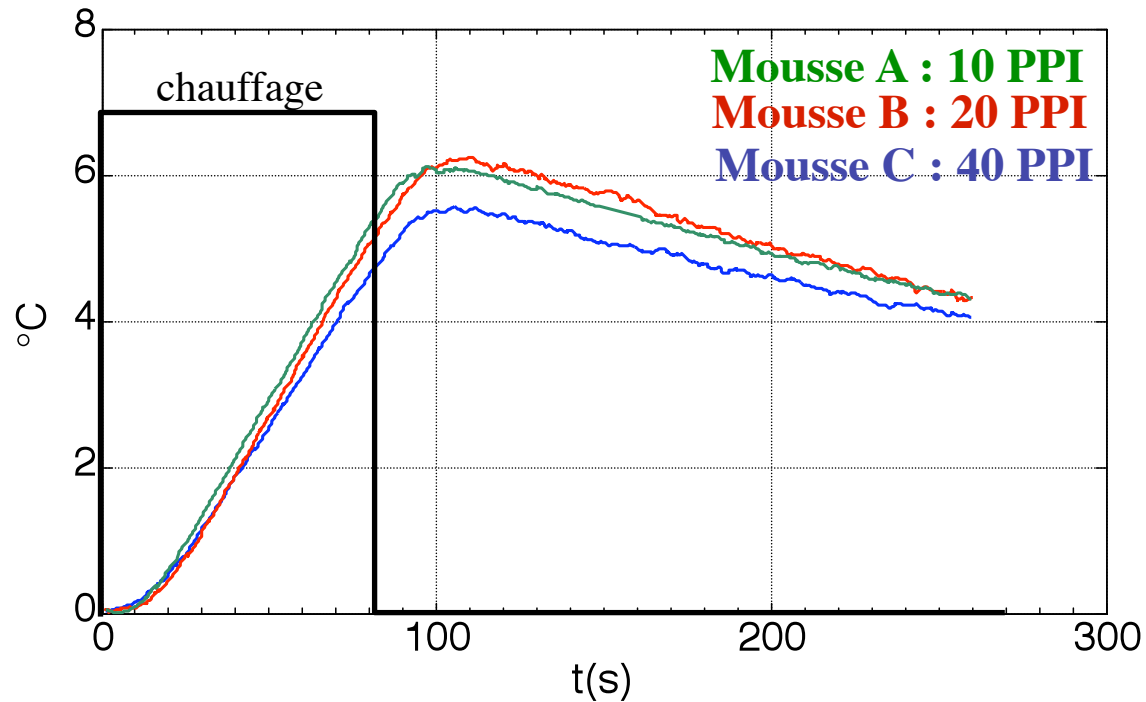
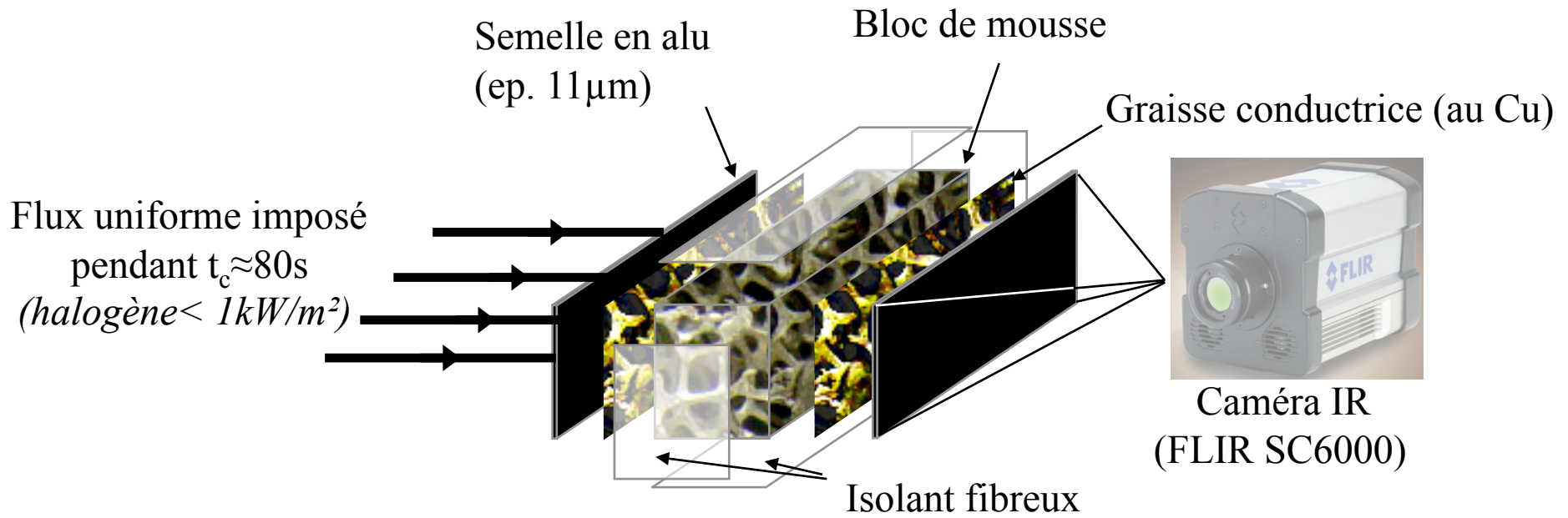
$$\varepsilon = \frac{\rho_{alu} - \rho_{mousse}}{\rho_{alu} - \rho_{air}}$$

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

Problème inverse d'estimation de paramètres



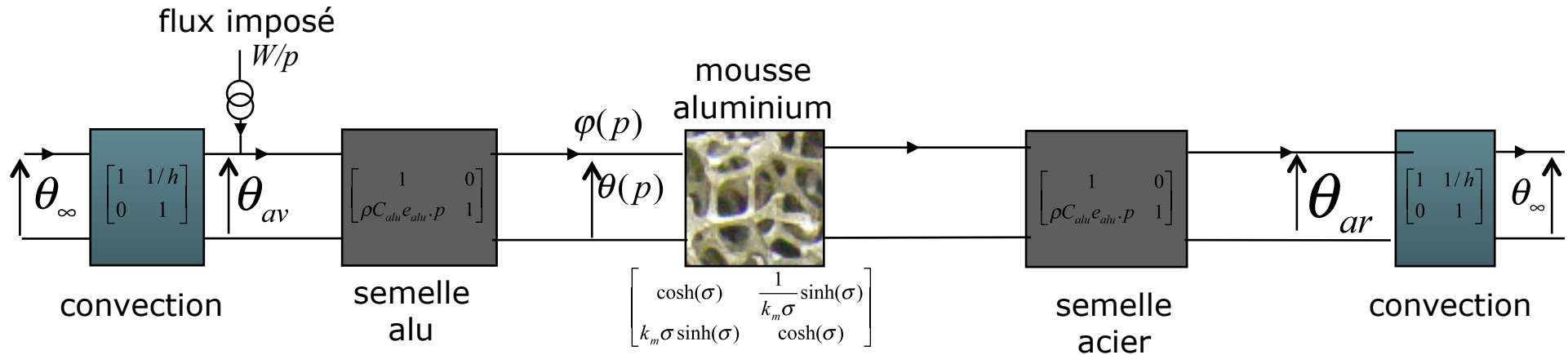
L'expérience photothermique



$s_{\text{bruit}} = 0.03^{\circ}\text{C}$

Modélisation directe de l'expérience : quadripôles thermiques

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



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

Paramètres	b_1	b_2	b_3	b_4	$(\sigma = \sqrt{p/\beta_1})$
	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}	8.10^{-2}	3.10^{-3}	

Paramètre d'intérêt car

$\alpha_m = k_m / \rho C_m$

Sensibilités

Sensibilités réduites :

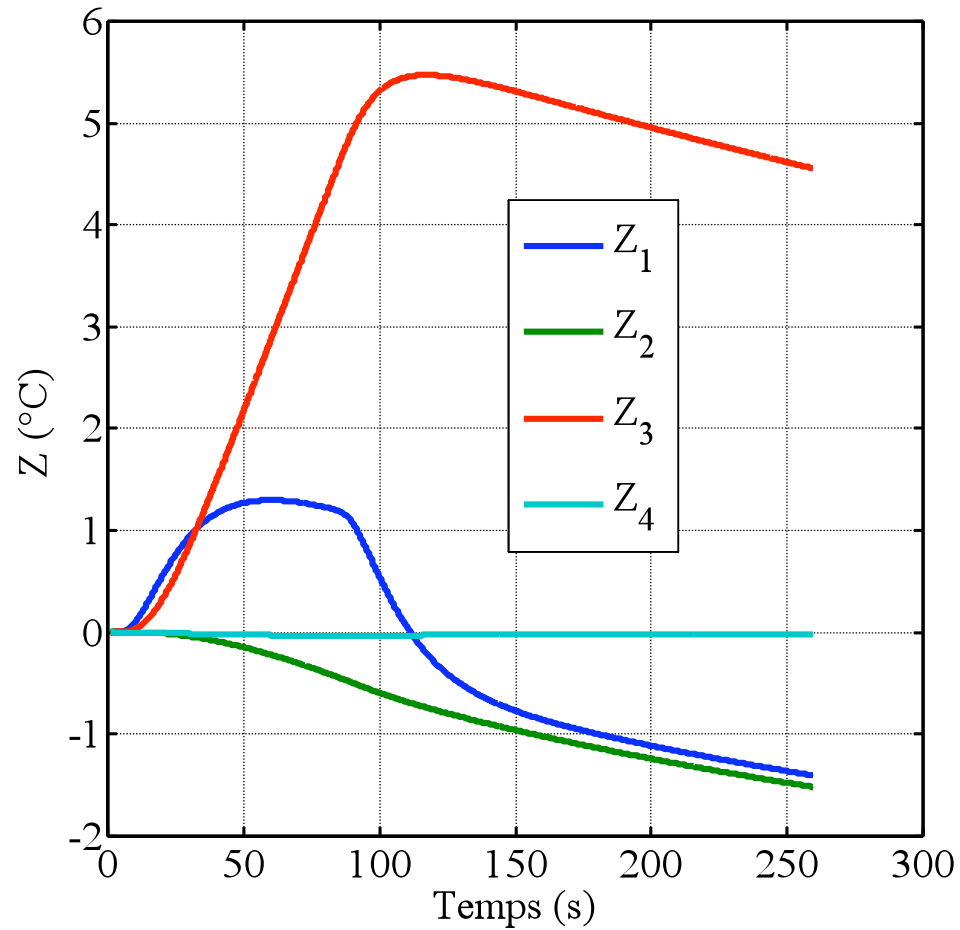
$$Z_k(t) = \beta_k X_k(t, \boldsymbol{\beta}) = \beta_k \frac{\partial \eta(t, \boldsymbol{\beta})}{\partial \beta_k} = \frac{\partial \eta(t, \boldsymbol{\beta})}{\frac{\partial \beta_k}{\beta_k}}$$

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

$$\beta_2 = h e_m / k_m$$

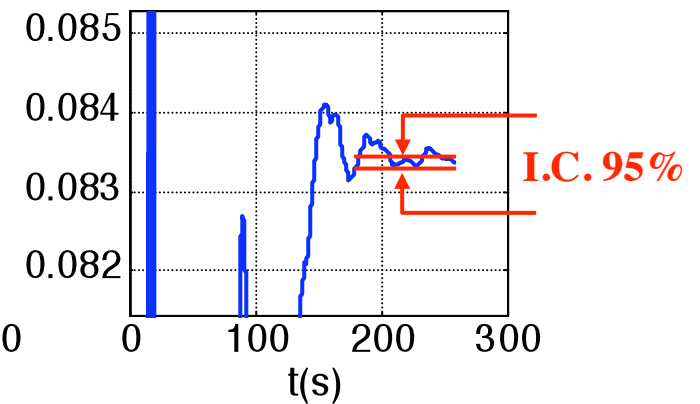
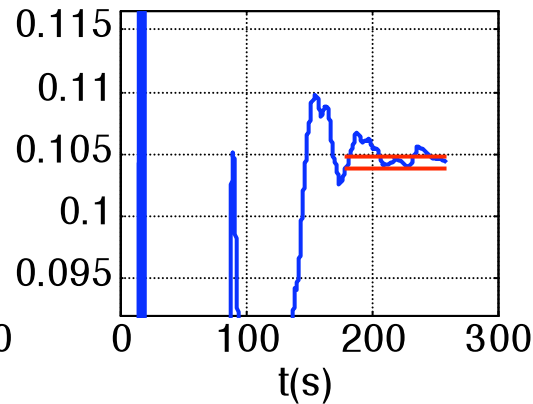
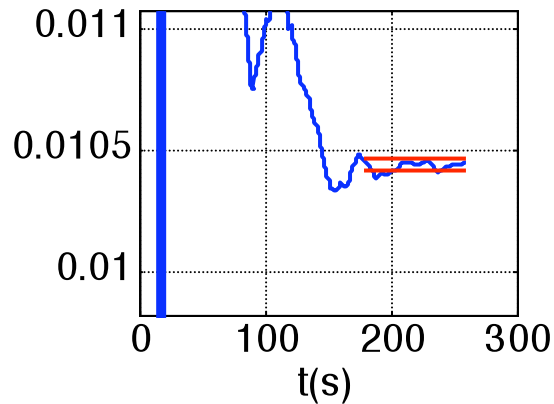
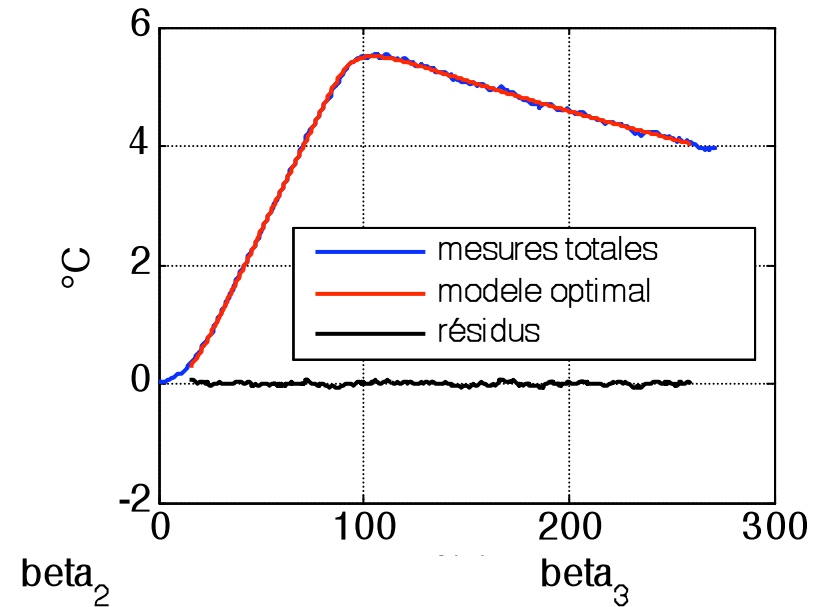
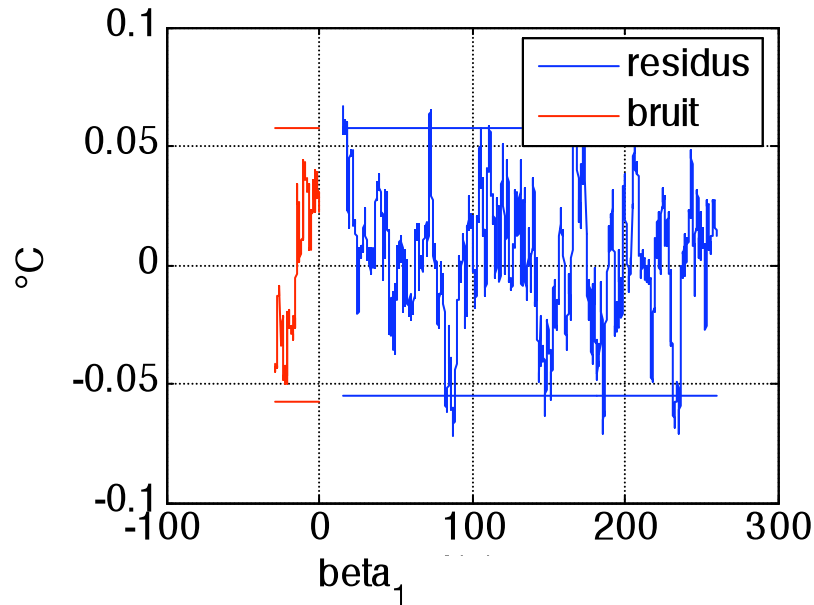
$$\beta_3 = W / \rho_m C p_m e_m$$

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



➡ Z_4 faible : b_4 fixé

Convergence, résidus, incertitudes



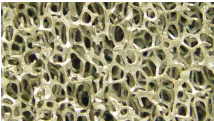
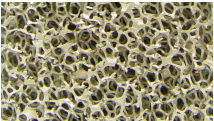
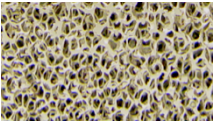
2 types d'incertitudes

- Aléatoire : amplification du **bruit de mesure**

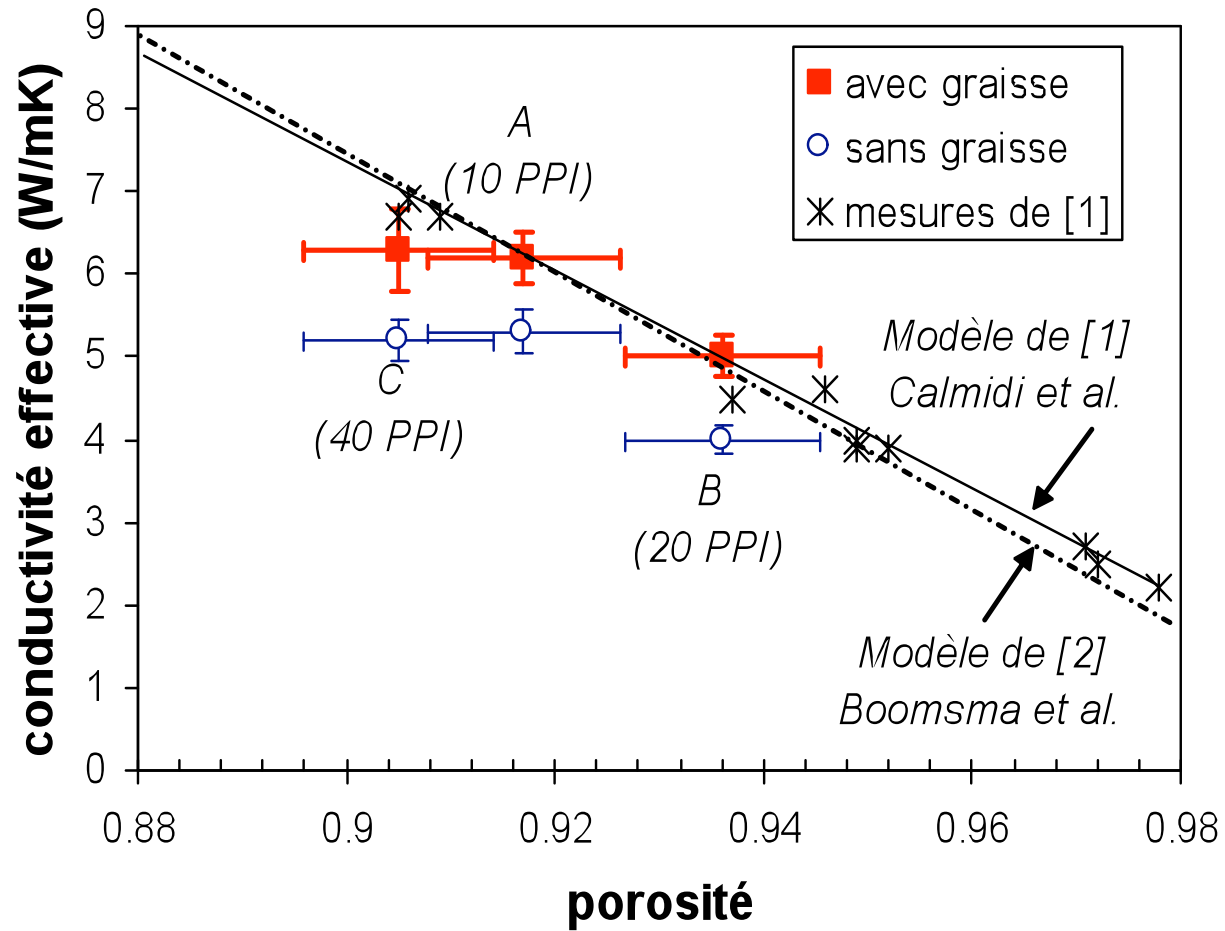
- Déterministe : amplification du **biais sur les paramètres fixés**

➔ $\beta_i \pm \Delta\beta_i$

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)	$k \pm Dk$	$h \pm Dh$
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

Résultats



Nos mesures en **diffusivimétrie** sont en accord avec celles de la littérature en conductivimétrie

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 :

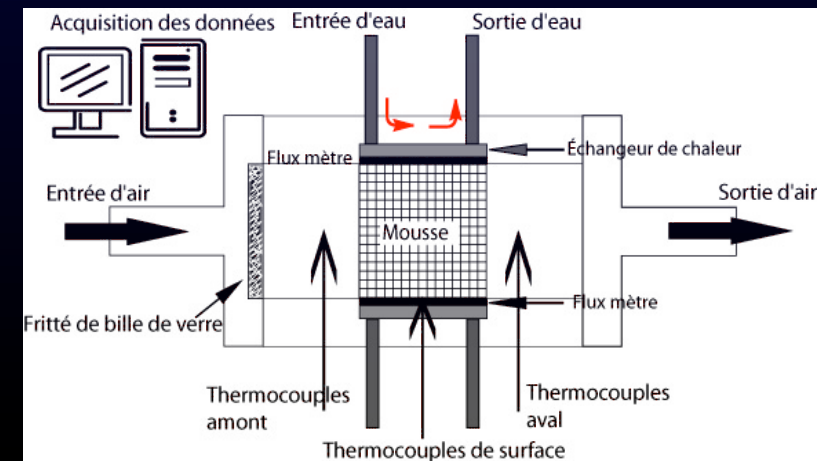
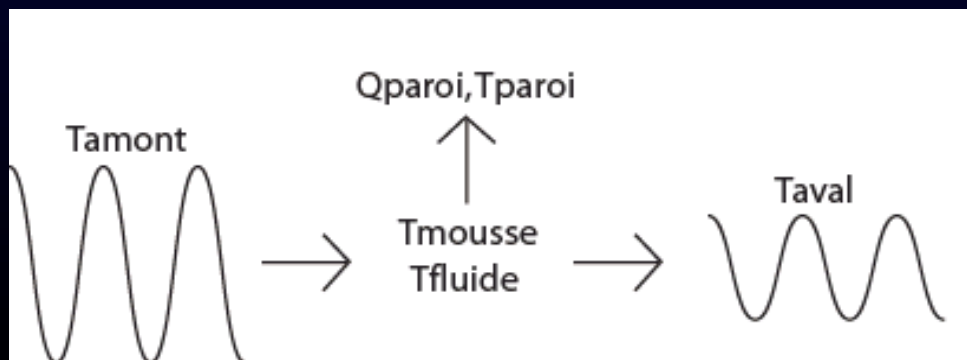
- coefficient d'échange entre phases
- dispersion

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

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

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

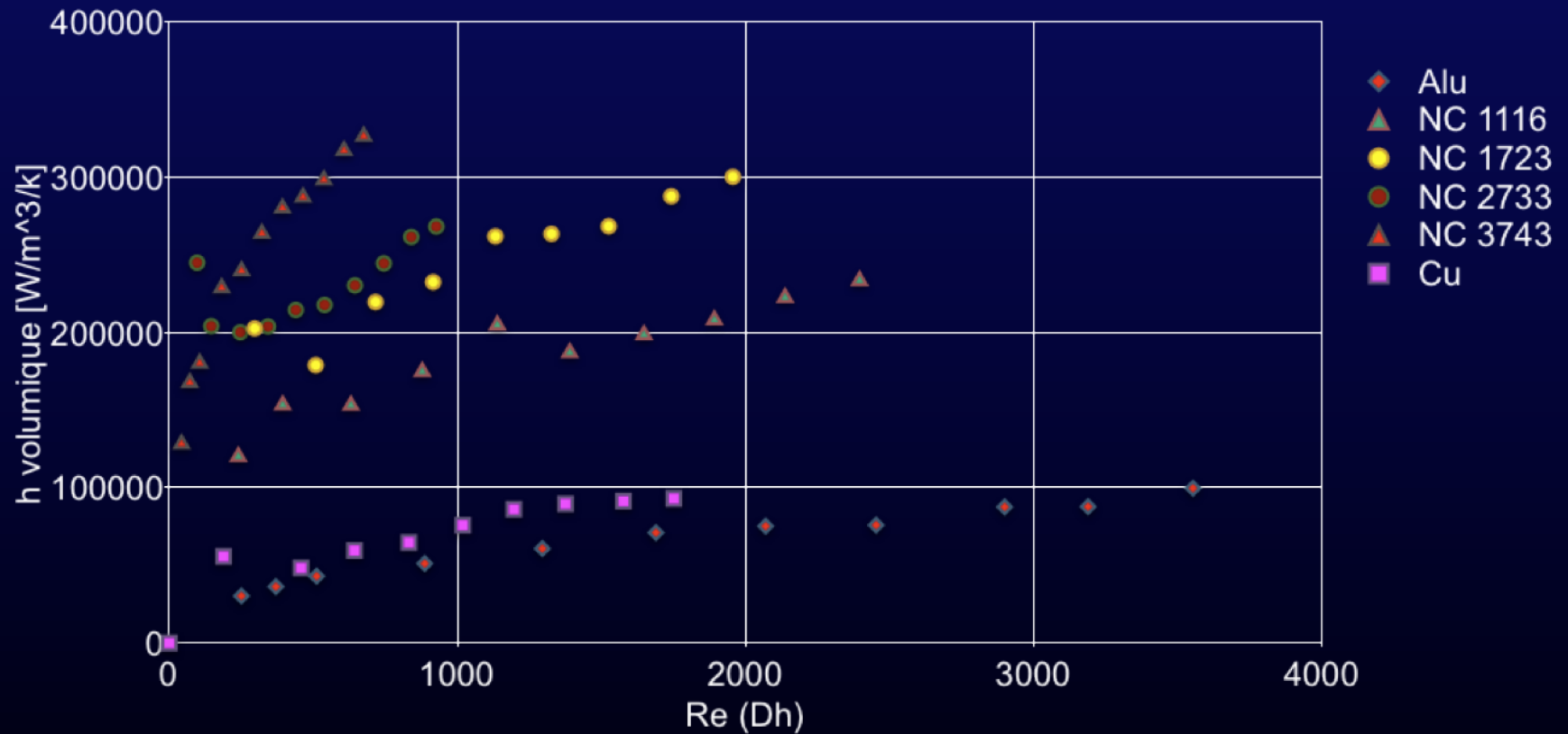
$$T_p = T_{p1} + T_{p2} \cos(\omega t) + T_{p3} \sin(\omega t)$$

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

○ Identification

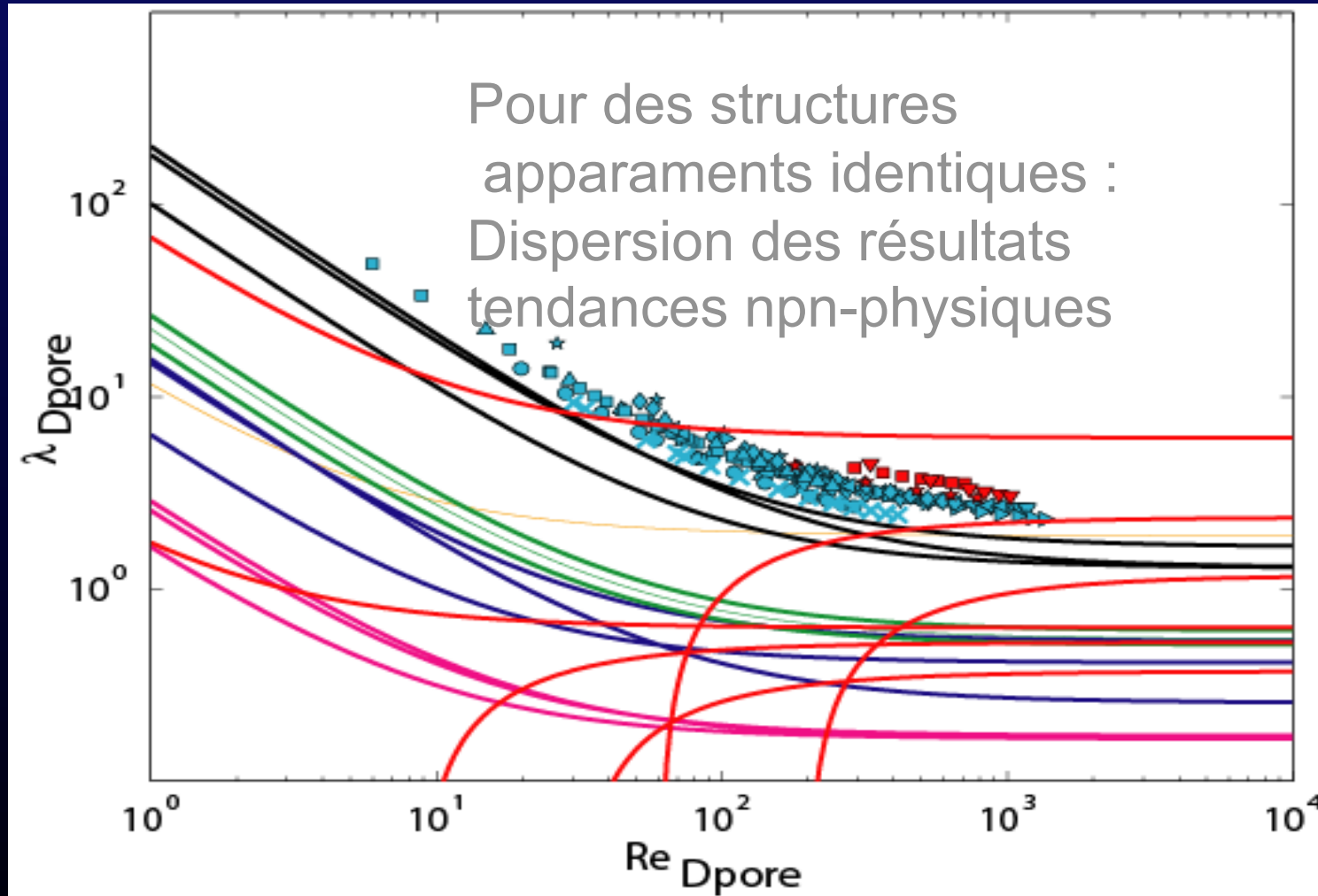
$$h = \frac{(\rho C_p (1-\varepsilon) \omega) T_{aval3}}{T_{amont2} - T_{amont2}}$$

Coefficient d'échange volumique en fonction du nombre de Reynolds



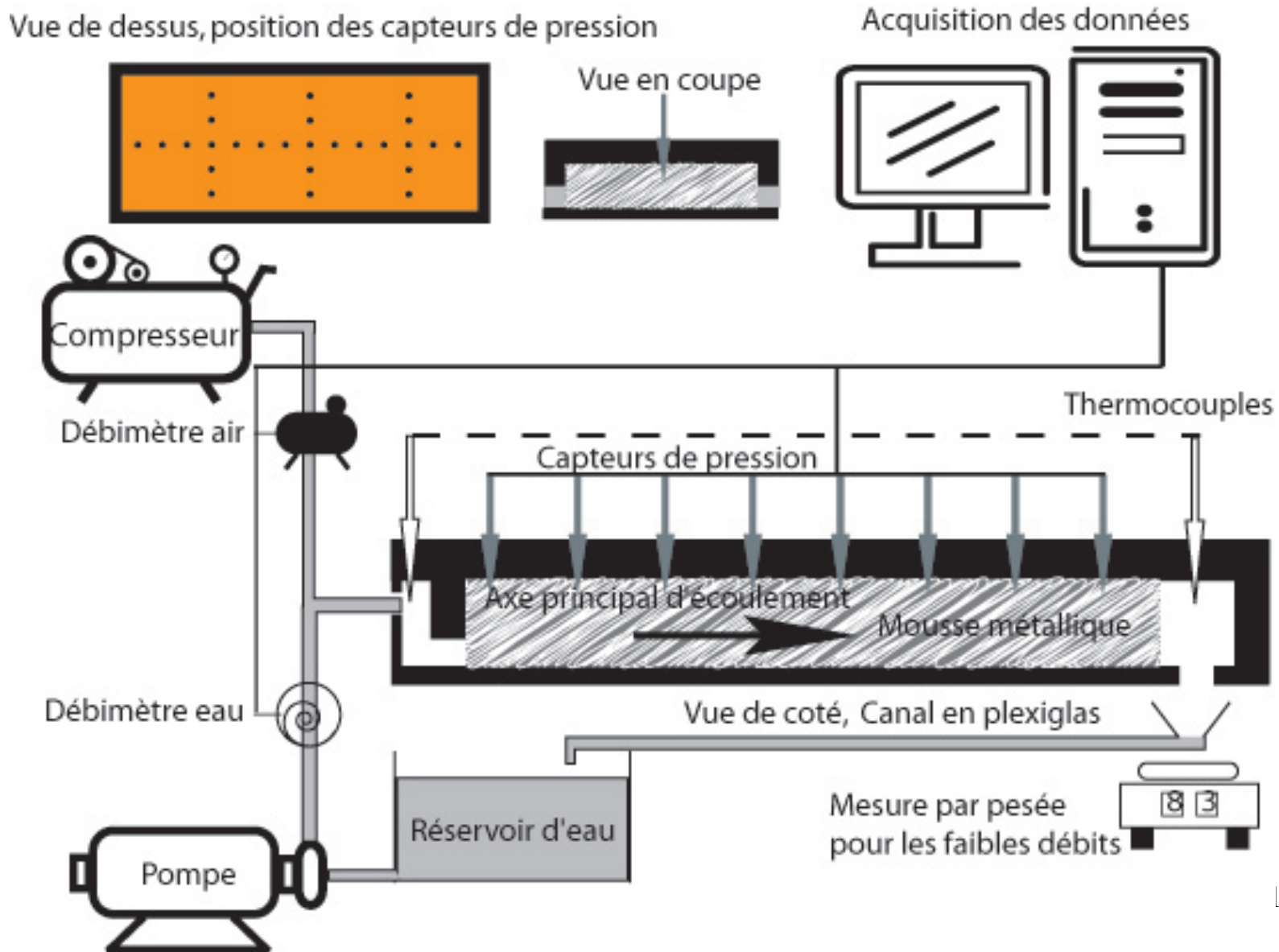
○ Corrélation à la morphologie

Problematique pertes de charges



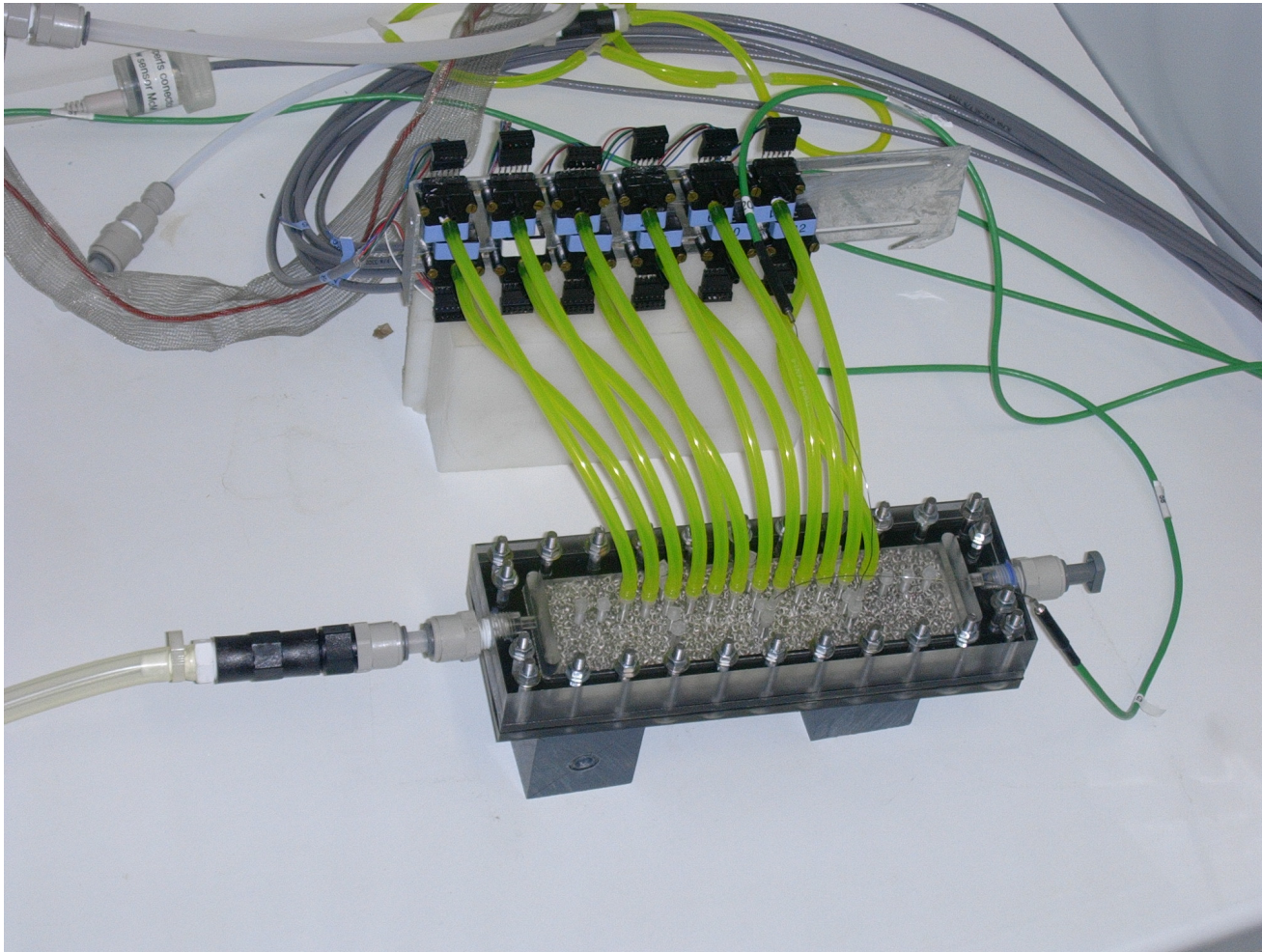
Dispositif expérimental

Conçu pour mesurer des “profils” de pression

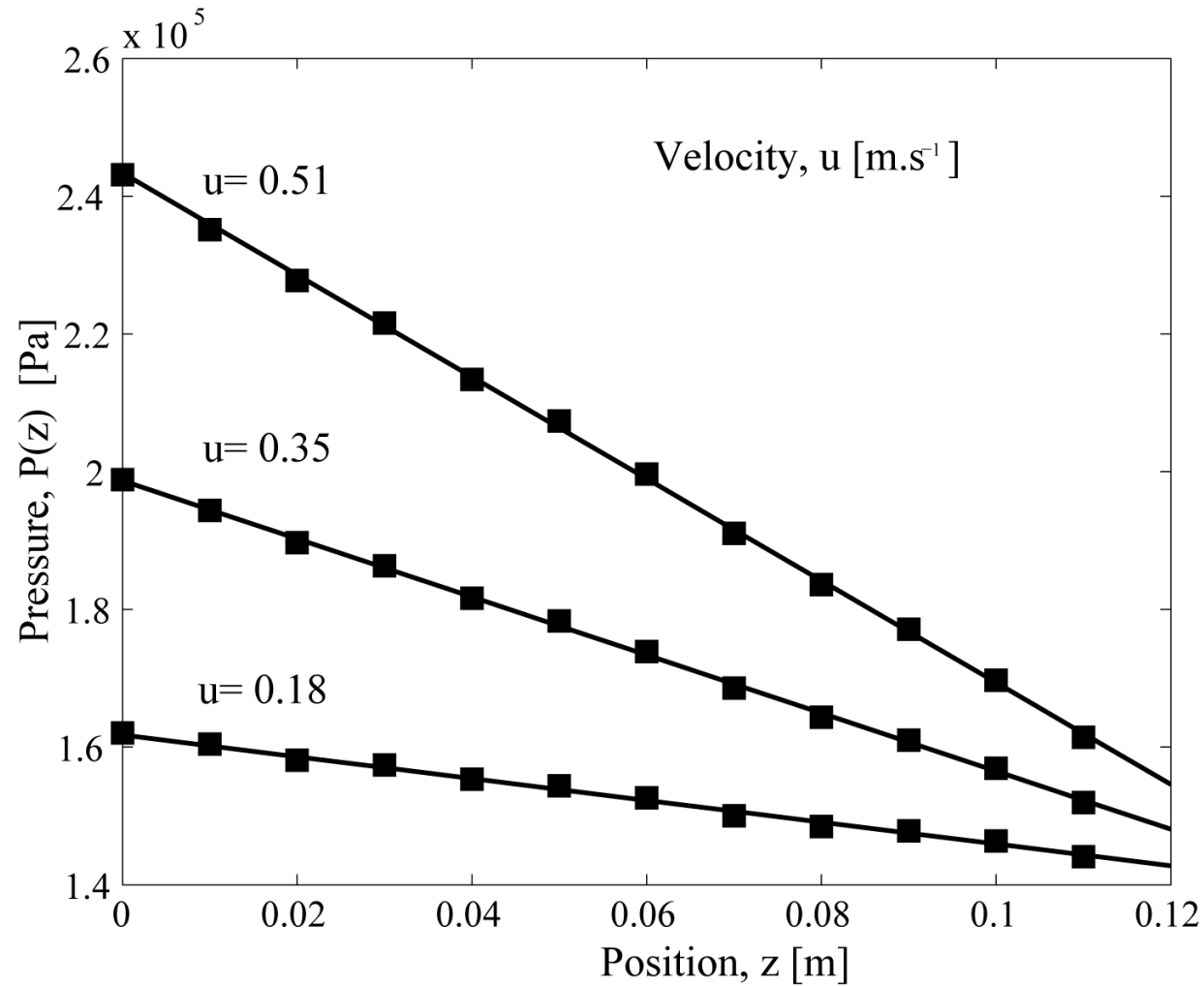


Dispositif expérimental. Conçu pour mesurer des “profils” de pression

- ✓ Configuration écoulement gazeux



Profils de pression pour trois débits d'eau constants



✓ Accord modèle linéaire / expérience

Forme de la loi d'écoulement ?

- Darcy: écoulement visqueux

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\mu}{K} \cdot u$$

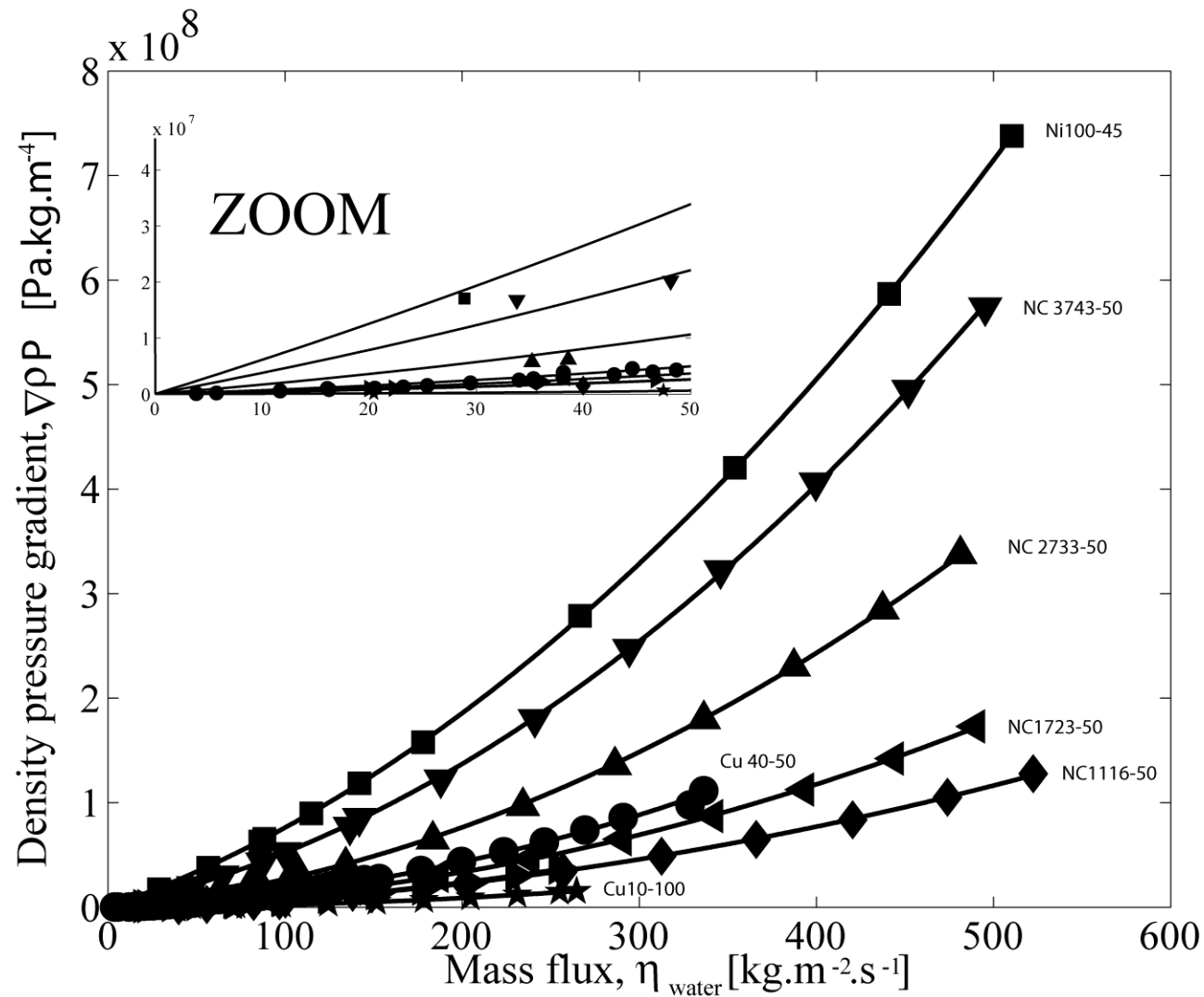
- Forchheimer: visqueux + effets inertiels

$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\mu}{K} \cdot u + \beta \cdot \rho \cdot u^2$$

- Loi Cubique (effets inertiels dépendants de la vitesse)

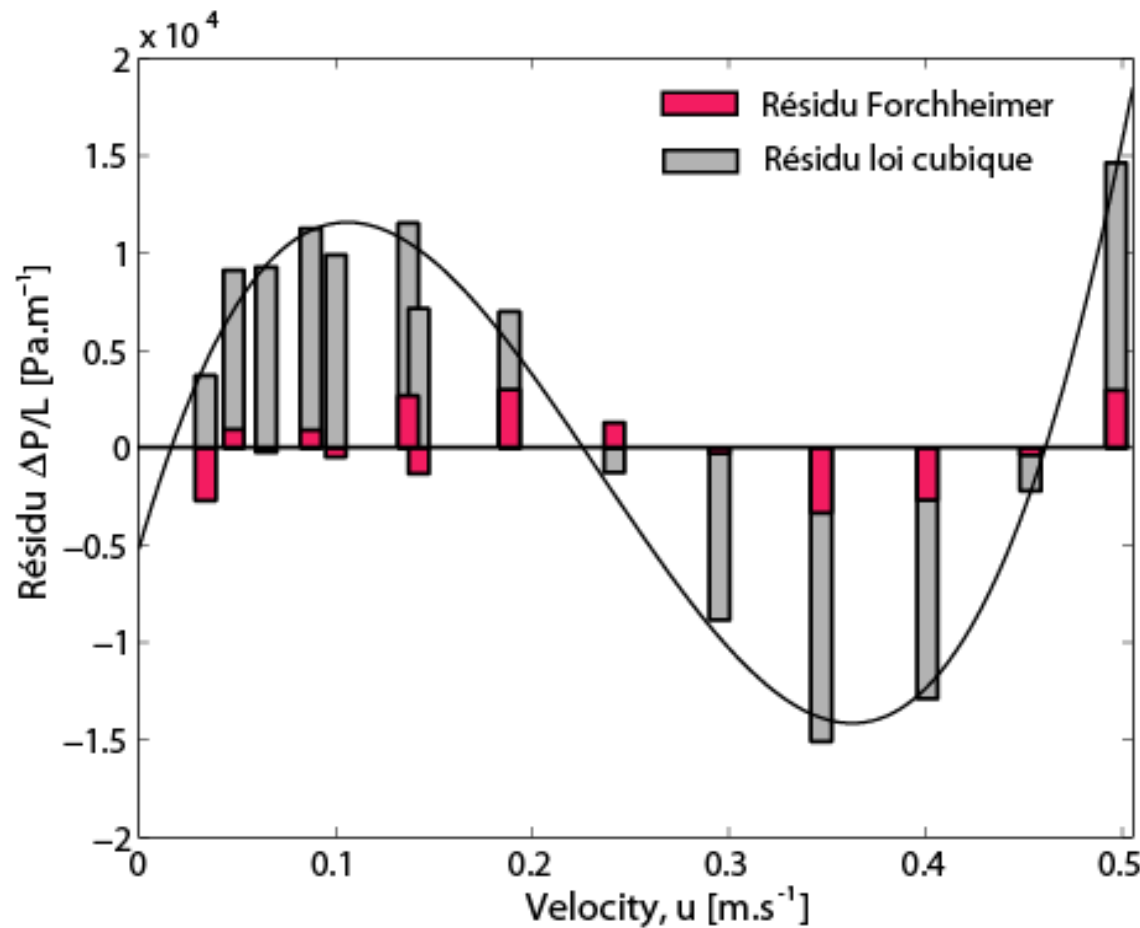
$$-\frac{dP}{dz} = \frac{\mu}{K} \cdot u + \frac{\gamma \cdot \rho^2}{\mu} \cdot u^3$$

Relation gradient de pression / densité de flux massique



- ✓ Validation
Comportement non linéaire pour toutes les vitesses d'écoulement testées
- ✓ Tous les échantillons

Choix de la loi d'écoulement



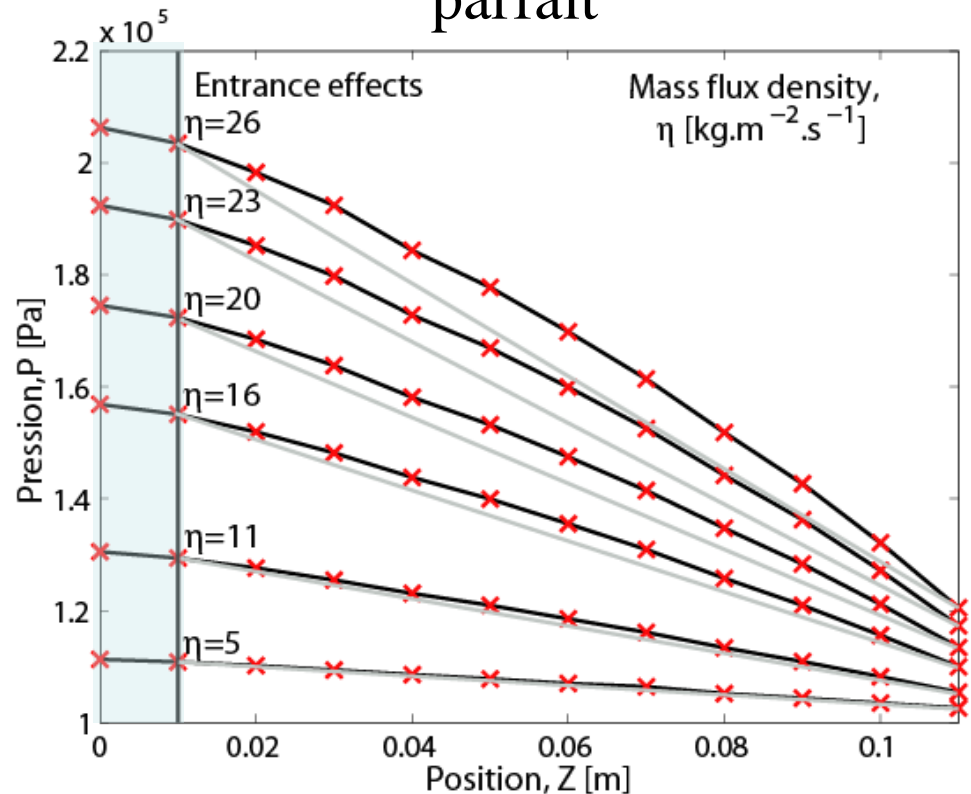
➤ Résidus loi cubique
~ 4 Résidus
Forchheimer

✓ Validation modèle Forchheimer pour les écoulements macroscopiques dans les mousses métalliques

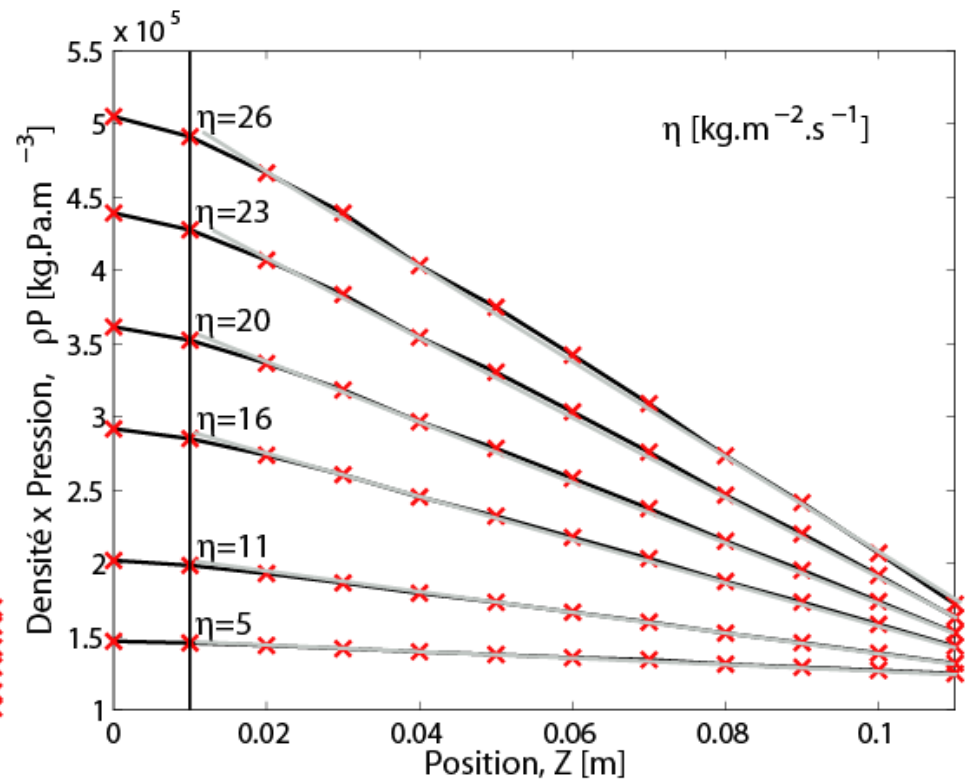
Impact des effets de compressibilité: $DP/P \sim 1$

➤ Air: gaz parfait

$$\frac{d\rho(z)P(z)}{dz} = -2 \left(\frac{\mu}{K} \eta + \beta \eta^2 \right)$$



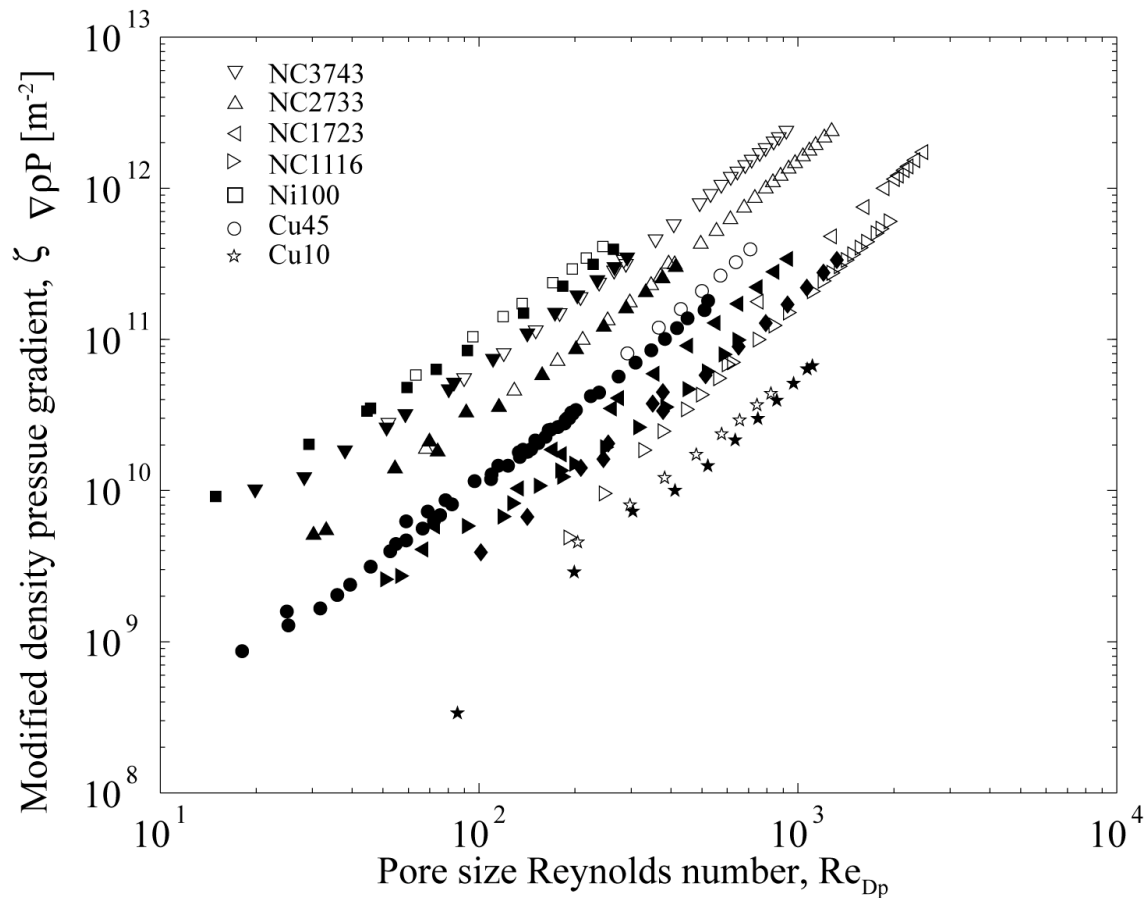
Compressibility effects even for low mass flux density. (air, NC 4753)



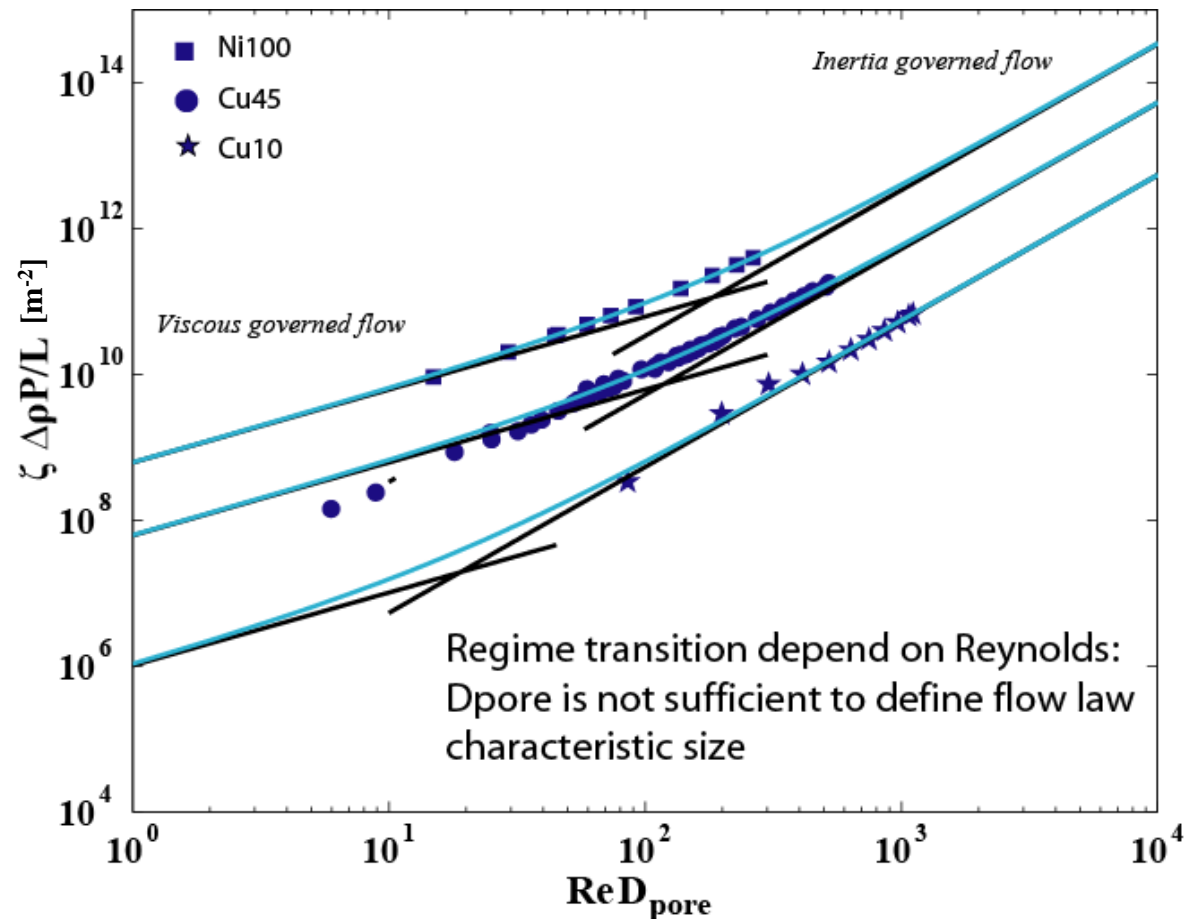
"density x pressure" versus position. (air, NC 4753)

Paramètres de loi d'écoulement: indépendant de la nature du fluide.

$$\left. \frac{d\rho P}{dz} \right|_{\alpha} = -\frac{\alpha\mu^2}{D_p} \left(\frac{1}{K} \text{Re} + \frac{\beta}{D_p} \text{Re}^2 \right) \quad \alpha = 1 \text{ ou } 2, \text{ respectivement eau et air.}$$

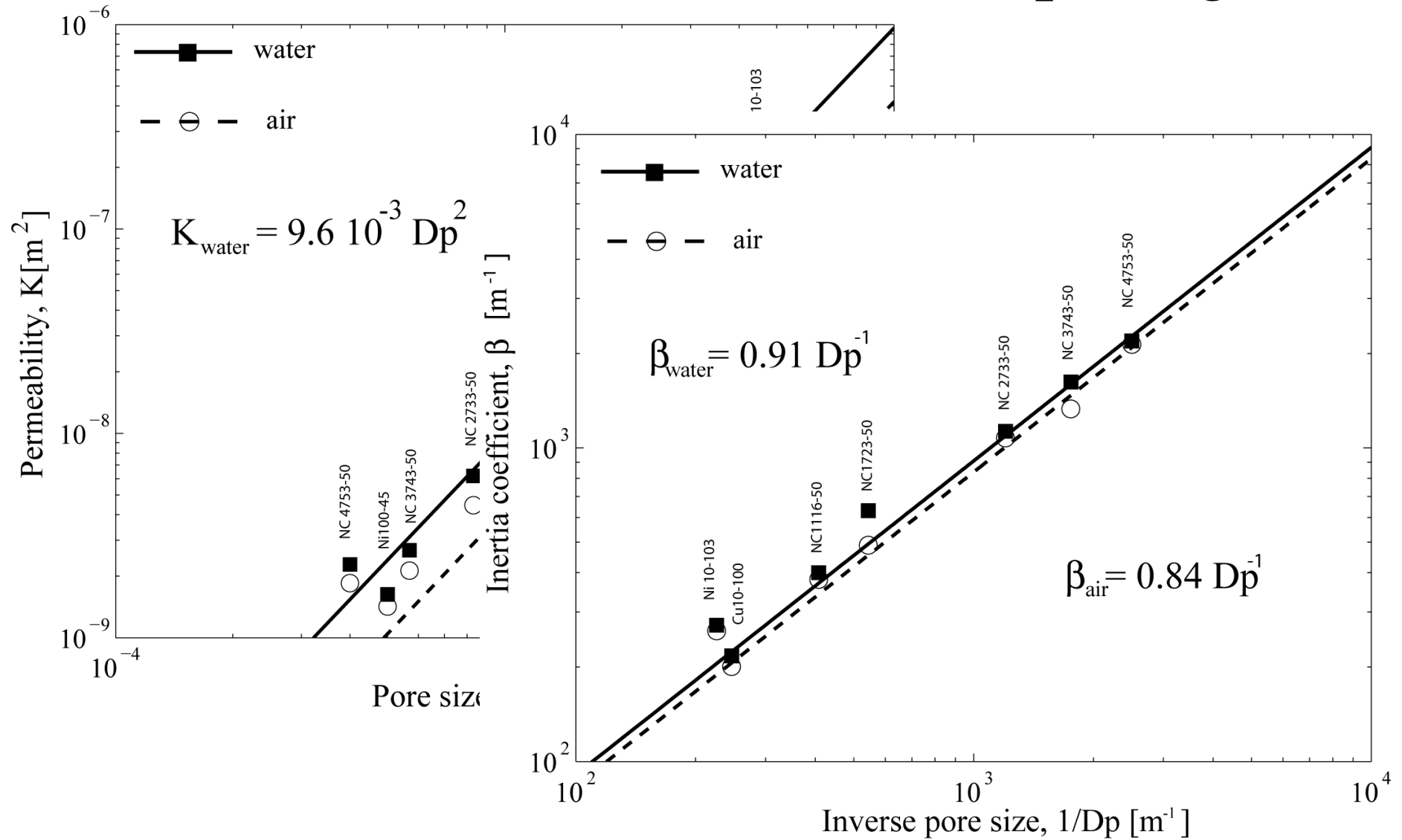


Effets visqueux et inertiels: transition de régime et taille de pore



Flow law asymptotic behavior ("scaling").
Pore size influence (water).

Paramètre loi d'écoulement / Morphologie



Pas de variation significative de porosité: Influence du paramètre difficilement mesurable.