Identification des paramètres thermo-dépendants et orthotropes pour un isolant thermique par modèle réduit

Encadrants :
Olivier QUÉMÉNER
Frédéric JOLY
Yassine ROUIZI

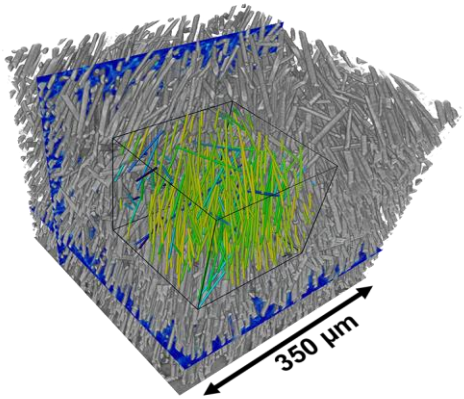
Doctorante :
Jianan NI

UNIVERSITÉ ÉVRY
PARIS-SACLAY

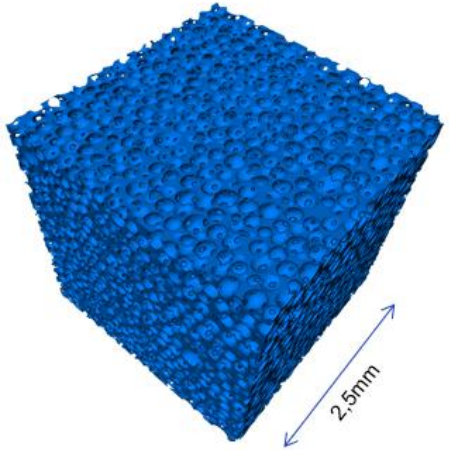
Lme Evry

université PARIS-SACLAY
ÉCOLE DOCTORALE
Sciences mécaniques et énergétiques, matériaux et géosciences (SMEMAG)

1. Contexte et objectifs



Contexte :
Les matériaux isolants présentent souvent des comportements thermiques complexes en raison de leur microstructure poreuse ou fibreuse.



Objectifs :
Développer une méthode inverse rapide basée sur un modèle réduit modal pour identifier les propriétés thermiques de matériaux complexes.

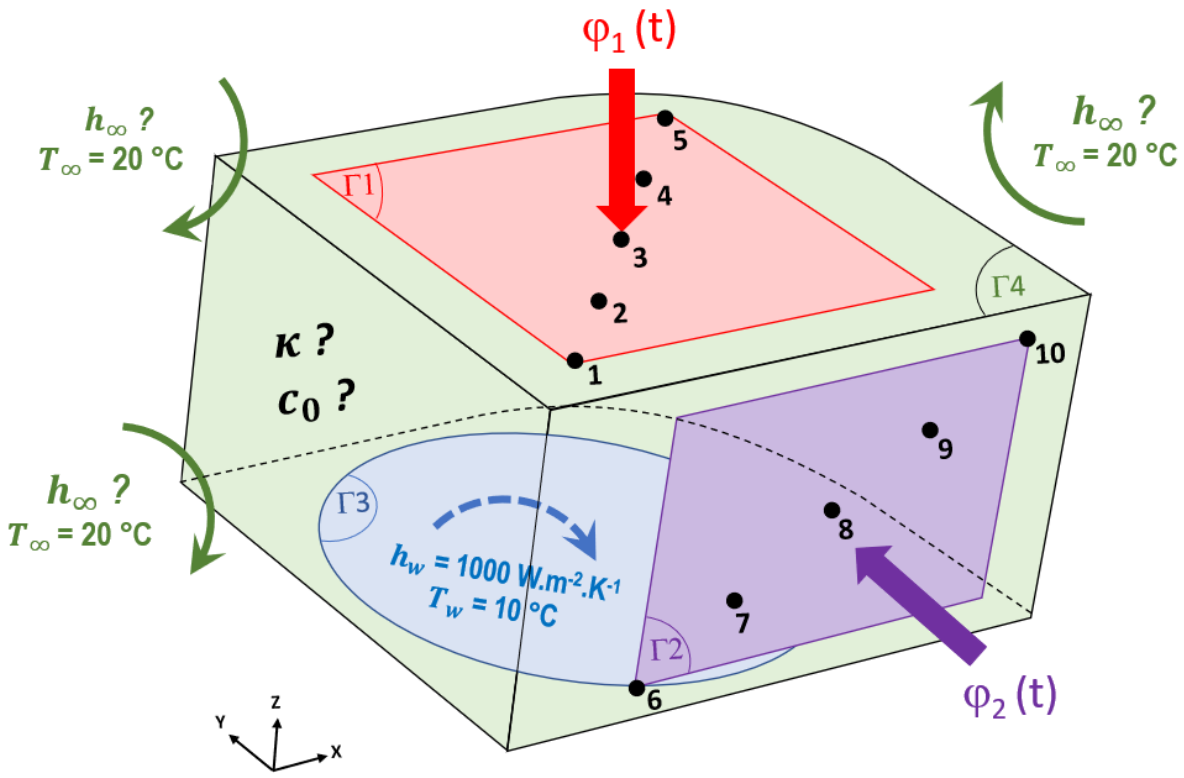
2. Paramètres

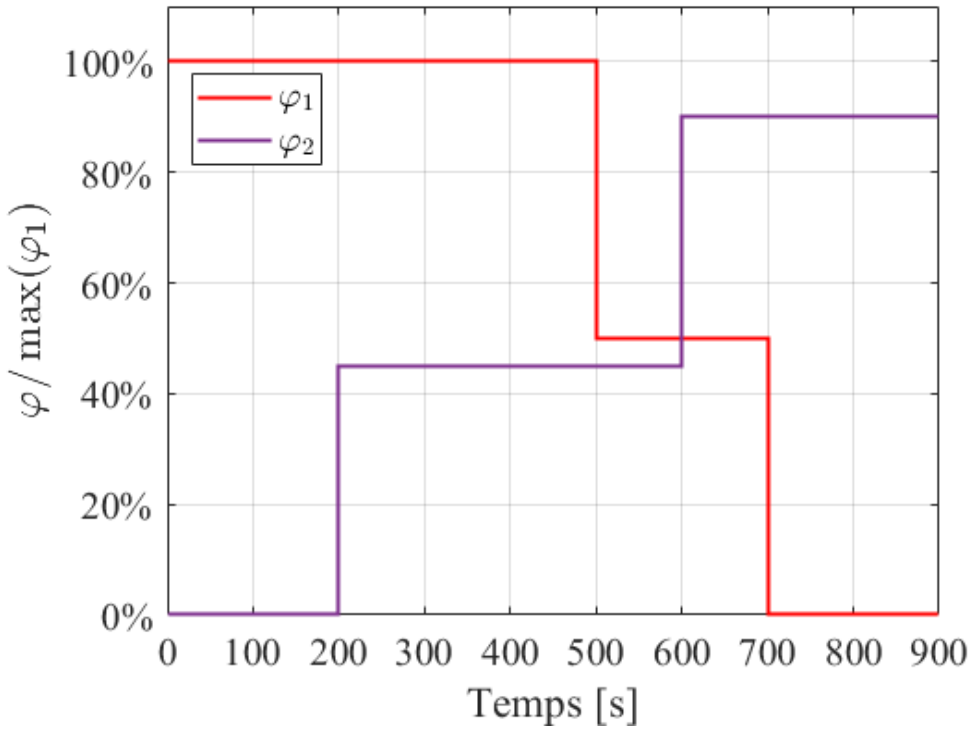
Matériaux isolants : propriétés et sollicitations thermiques

n°	Material	κ_{x0} $[mW.m^{-1}.K^{-1}]$	κ_{x1} $[mW.m^{-1}.K^{-2}]$	κ_{z0} $[mW.m^{-1}.K^{-1}]$	κ_{z1} $[mW.m^{-1}.K^{-2}]$	c_0 $[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$	h_∞ $[W.m^{-2}.K^{-1}]$	max (φ_1) $[W.m^{-2}]$
1	Polystyrene (constant κ)	33.0	0	33.0	0	43.10	8	75
2	Cellular glass (constant κ)	40.4	0	40.4	0	70.60	10	250
3	Polyurethane (constant κ)	27.6	0	27.6	0	38.84	15	100
4	Ceramic fibers (constant κ)	80.0	0	50.0	0	110.00	18	450
5	Rock wool (constant κ)	50.0	0	40.0	0	123.60	12	400
6	Polystyrene (κ(T))	28.5	0.112	28.5	0.112	43.10	8	75
7	Cellular glass (κ(T))	34.1	0.158	34.1	0.158	70.60	13	250
8	Polyurethane (κ(T))	21.3	0.158	21.3	0.158	38.84	18	100
9	Ceramic fibers (κ(T))	64.1	0.5	23.2	0.8	110.00	10	1000

- Matériaux 1-3: Matériaux isolants isotropes
- Matériaux 4-5: Matériaux isolants orthotropes
- Matériaux 6-8: Matériaux isolants isotropes thermo-dépendants
- Matériaux 9: Matériaux orthotropes thermo-dépendants

3. Problème physique (Orthotrope thermo-dépendant)





3. Problème physique

$$\Omega : \; c_0 \dot{T} = \underline{\nabla} \cdot \left(\kappa(T) \underline{\nabla} T\right)$$
$$\Gamma_1 : \kappa(T) \underline{\nabla} T \cdot \underline{n} = \varphi_1$$
$$\Gamma_2 : \kappa(T) \underline{\nabla} T \cdot \underline{n} = \varphi_2$$
$$\Gamma_3 : \kappa(T) \underline{\nabla} T \cdot \underline{n} = h_w (T_w - T)$$
$$\Gamma_4 : \kappa(T) \underline{\nabla} T \cdot \underline{n} = h_\infty (T_\infty - T)$$

EF

Hypothèse:

$$\begin{bmatrix} \kappa_x(T) & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_x(T) & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_z(T) \end{bmatrix}$$

Et

$$\begin{cases} \kappa_x(T) = \kappa_{x0} + \kappa_{x1} T \\ \kappa_z(T) = \kappa_{z0} + \kappa_{z1} T \end{cases}$$

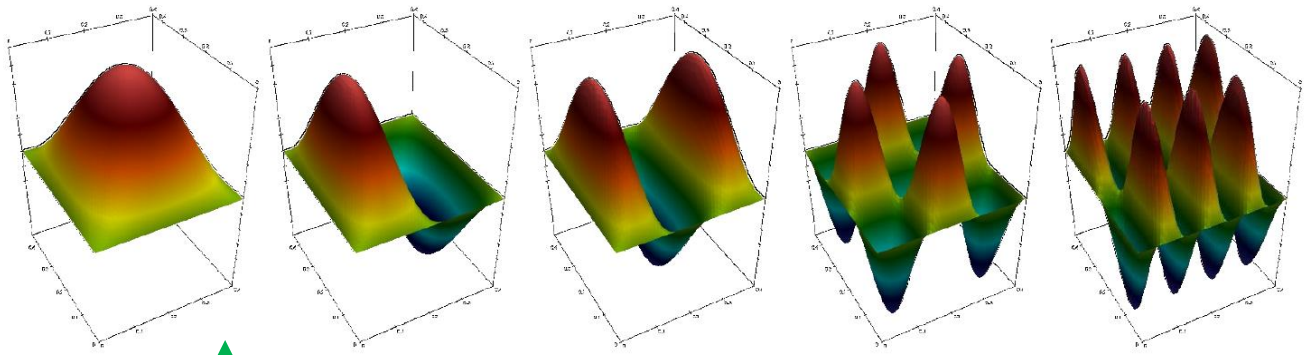
$$c_0 \mathbf{C} \frac{\partial T}{\partial t} =$$
$$-\kappa_{x0} \left(\mathbf{K_{x0}} + \mathbf{K_{y0}}\right) T - \kappa_{z0} \mathbf{K_{z0}} T$$
$$- \kappa_{x1} \left[\mathbf{K_{x1}}(T) + \mathbf{K_{y1}}(T)\right] T - \kappa_{z1} \mathbf{K_{z1}}(T) T$$
$$- h_\infty \mathbf{H}_\infty^{\mathbf{R}} T - \mathbf{H}_{\mathbf{w}}^{\mathbf{R}} T + h_\infty U_\infty^R + U_{w,\varphi_1,\varphi_2}^R$$

DDL : 33 311
Temps : 2 heures

Paramètres : $\boldsymbol{\kappa_{x0}, \kappa_{x1}, \kappa_{z0}, \kappa_{z1}, c_0, h_\infty}$

4. Modèles réduits

$$c_0 \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla}(\kappa \vec{\nabla} T)$$



$$\begin{cases} \kappa_x(T) = \kappa_{x0} + \kappa_{x1} T \\ \kappa_z(T) = \kappa_{z0} + \kappa_{z1} T \end{cases}$$

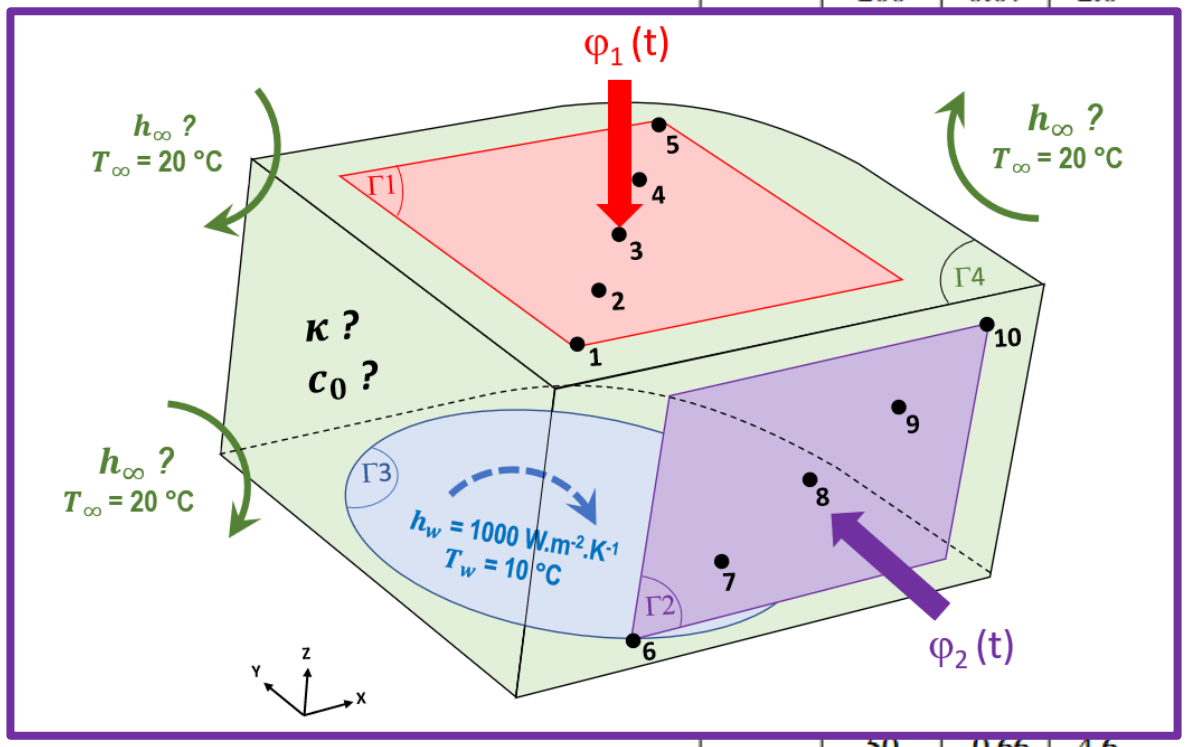
$$T(M,t) = \sum_{i=1}^{n} x_i(t) V_i(M)$$

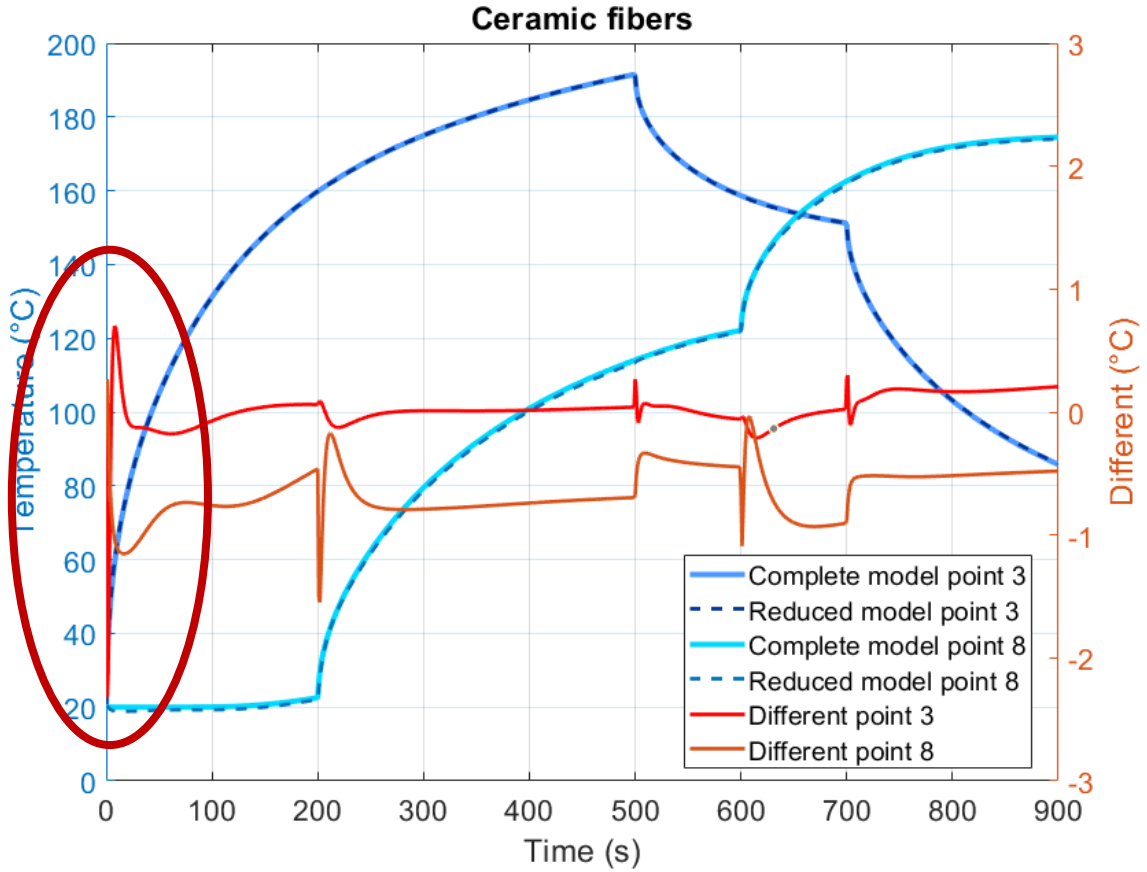
$$c_0 \mathbf{C^R} \frac{\partial X}{\partial t} = -\left[\kappa_{x0} \left(\mathbf{K^R_{x0}} + \mathbf{K^R_{y0}} \right) + \kappa_{z0} \mathbf{K^R_{z0}} + \kappa_{x1} \left(\sum_{k=1}^{N} \boldsymbol{x_k}(\mathbf{t}) (\mathbf{K^R_{x1}} + \mathbf{K^R_{y1}}) \right) + \kappa_{z1} \sum_{k=1}^{N} \boldsymbol{x_k}(\mathbf{t}) \mathbf{K^R_{z1}} + h_\infty \mathbf{H^R_\infty} + \mathbf{H^R_w} \right] X + h_\infty U^R_\infty + U^R_{w,\varphi_1,\varphi_2}$$

Paramètres : $\boldsymbol{\kappa_{x0}, \kappa_{x1}, \kappa_{z0}, \kappa_{z1}, c_0, h_\infty}$

4. Validation du modèle réduit

	Case study	T_{max} [°C]	Mode [Unit]	$\bar{\varepsilon}$ [%]	ε_{max} [%]
1	Polystyrene (constant κ)	43.1	50	0.02	3.7
			100	0.09	3.5
			200	0.07	2.0
8	Polyurethane (κ(T))	62.0	50	-0.66	4.6
			100	0.03	3.9
			200	0.16	2.1
9	Ceramic fibers (κ(T))	173.1	50	-0.42	6.9
			100	-0.25	3.9
			200	-0.18	2.3

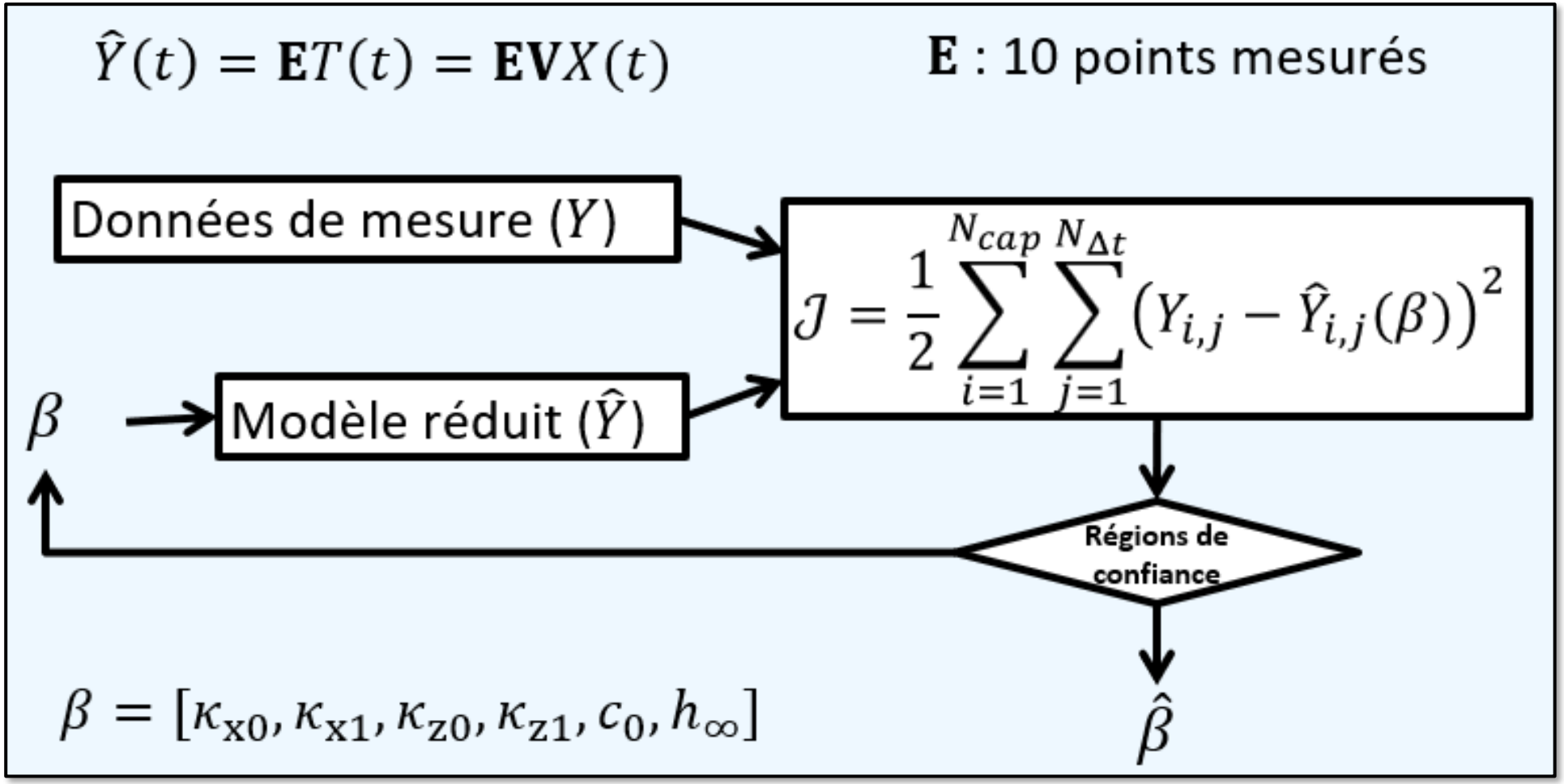




Évolution de la température avec **200 modes** pour les **fibres céramiques**

Gain de temps: 380

5. Identification par problème inverse



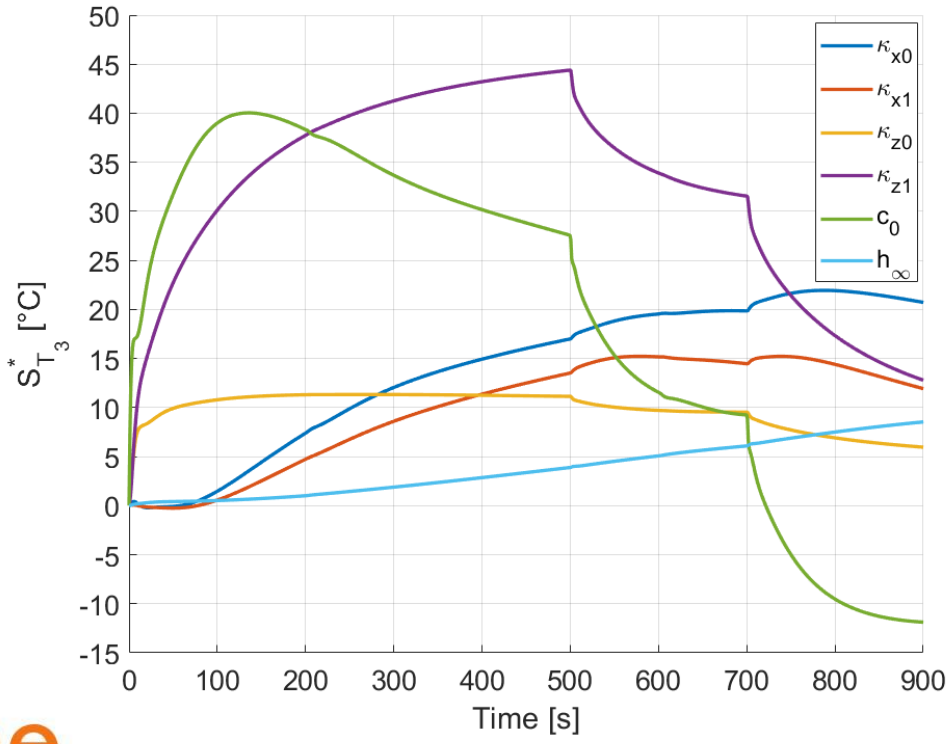
5. Sensibilité réduite

Paramètres : $\kappa_{x0}, \kappa_{x1}, \kappa_{z0}, \kappa_{z1}, c_0, h_\infty$

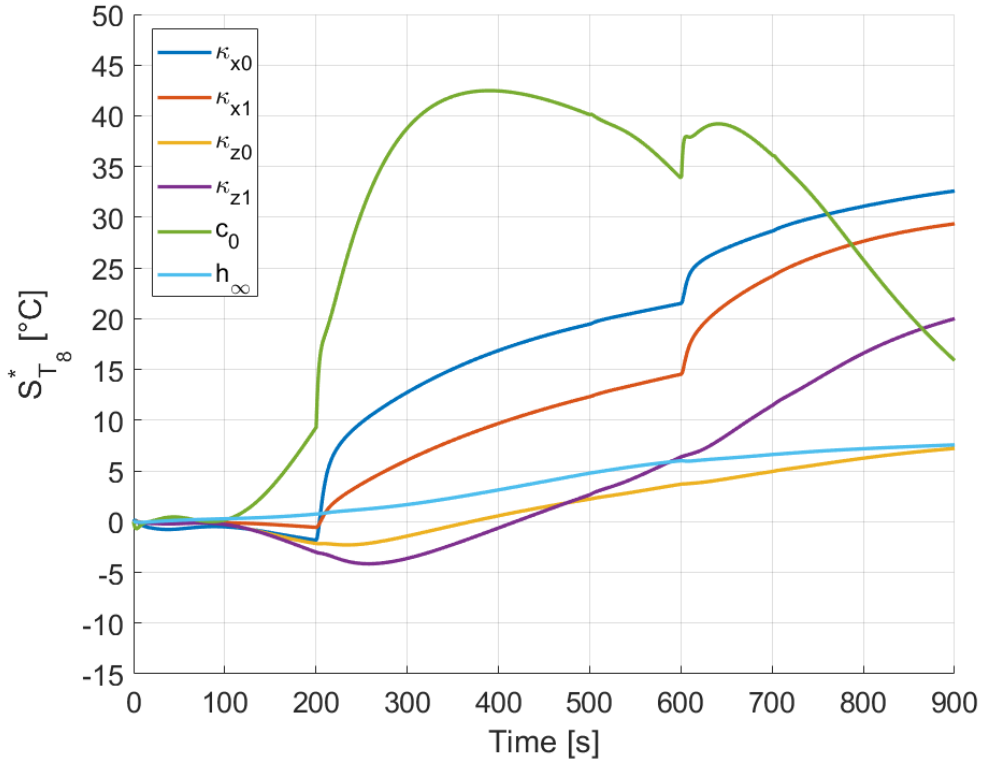
$$S^*_{i,j} = \beta_j \frac{\partial Y_i}{\partial \beta_j}$$

i points
j temps

Sensibilité réduite de fibre céramique au point 3



Sensibilité réduite de fibre céramique au point 8



3. Résultats (Précision)

Résultats de l'identification avec 200 modes **sans bruit de mesure** (Valeurs relatives)

	case	$\varepsilon_{\kappa_{x0}}$ [%]	$\varepsilon_{\kappa_{x1}}$ [%]	$\varepsilon_{\kappa_{z0}}$ [%]	$\varepsilon_{\kappa_{z1}}$ [%]	ε_{c_0} [%]	ε_{h_∞} [%]	Times [s]
1	Polystyrene (constant κ)	0.1	/	-1.2	/	1.2	3.6	856
2	Cellular glass (constant κ)	-0.4	/	-1.6	/	1.1	0.1	934
3	Polyurethane (constant κ)	-0.2	/	-1.4	/	1.9	3.2	1521
4	Ceramic fibers (constant κ)	-1.2	/	-1.8	/	1.6	0.6	1466
5	Rock wool (constant κ)	-1.8	/	-1.9	/	1.5	-0.5	1315
6	Polystyrene (κ(T))	1.2	14.9	3.2	-27.5	1.1	3.8	649
7	Cellular glass (κ(T))	-1.5	0.8	2.5	-14.1	1.0	3.0	763
8	Polyurethane (κ(T))	1.9	-13.3	7.2	-22.7	1.9	6.2	1012
9	Ceramic fibers (κ(T))	-0.8	1.4	3.4	-1.3	-0.8	-2.2	934

$\varepsilon_{\kappa_{x0}}$ $\varepsilon_{\kappa_{z0}}$ et $\varepsilon_{\kappa_{c0}}$: Résultats satisfaitsants

$\varepsilon_{\kappa_{x1}}, \varepsilon_{\kappa_{z1}}$: Faible temperature → thermodépendance peu sollicitée

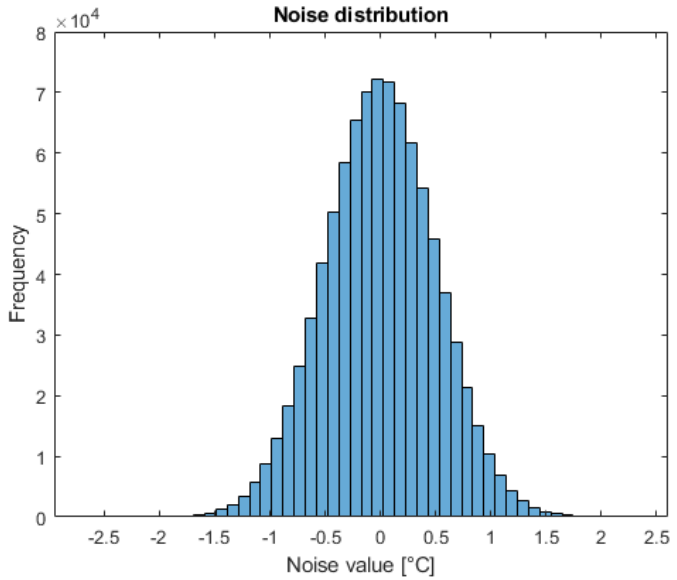
Haute temperature → meilleure identification

4. Analyse de l'erreur d'identification

Erreur = ?

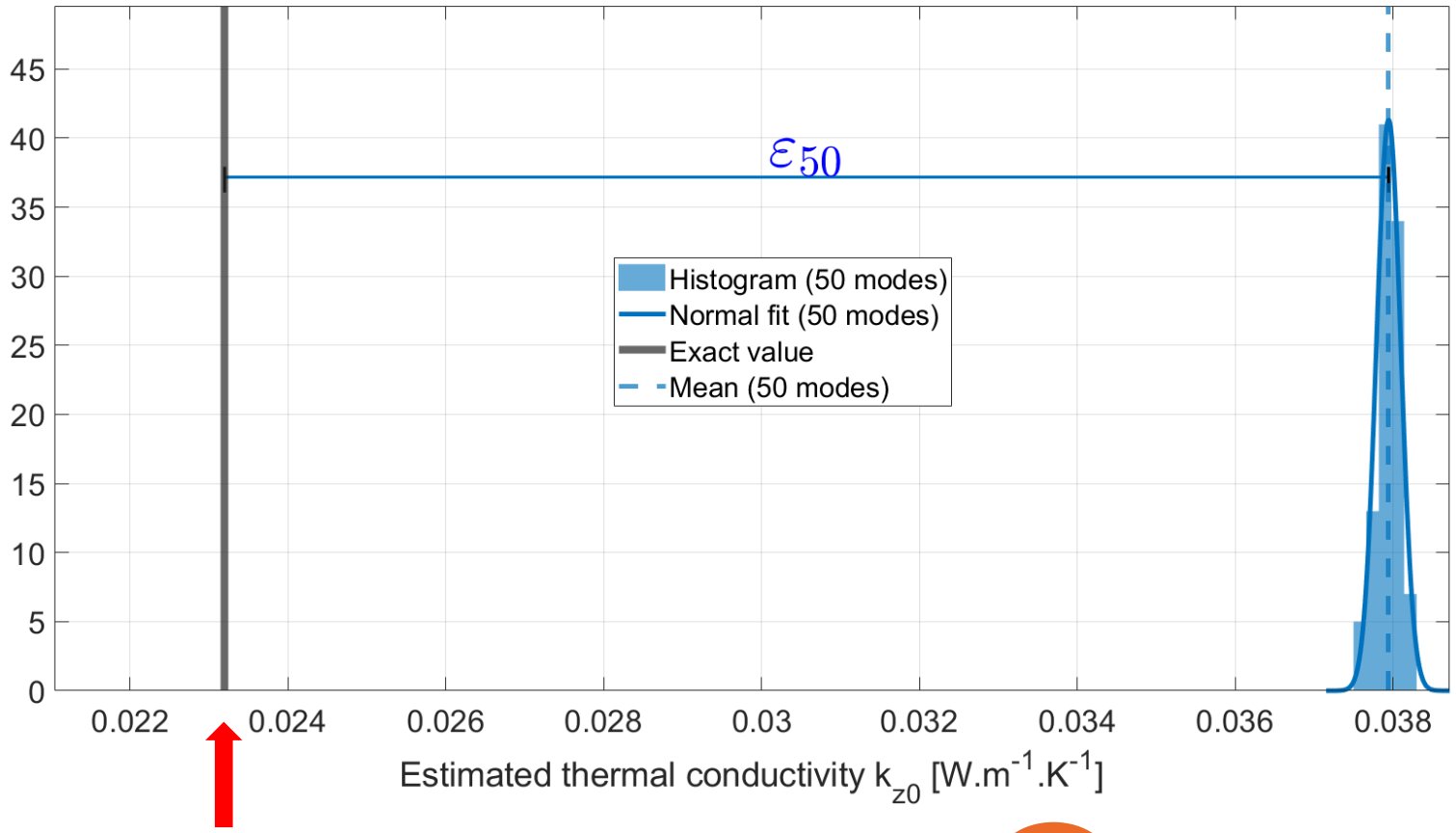
Erreur = f (Modèle,Expérience)
$= f$ (*Ordre du modèle*, *Bruit de mesure*)

Erreur = $f\ (\varepsilon \pm 3\ std)$



100 essais avec bruit gaussien (0,5 °C)

Distribution de κ_{z0} estimés pour différents nombres de modes (100 estimations)



Valeur exacte

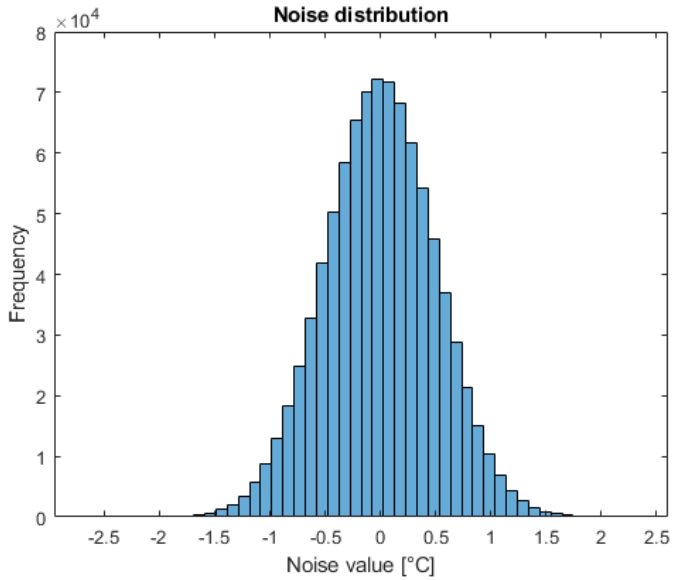
Paramètres : $\boldsymbol{\kappa_{x0}, \kappa_{x1}, \kappa_{z0}, \kappa_{z1}, c_0, h_\infty}$

4. Analyse de l'erreur d'identification

Erreur = ?

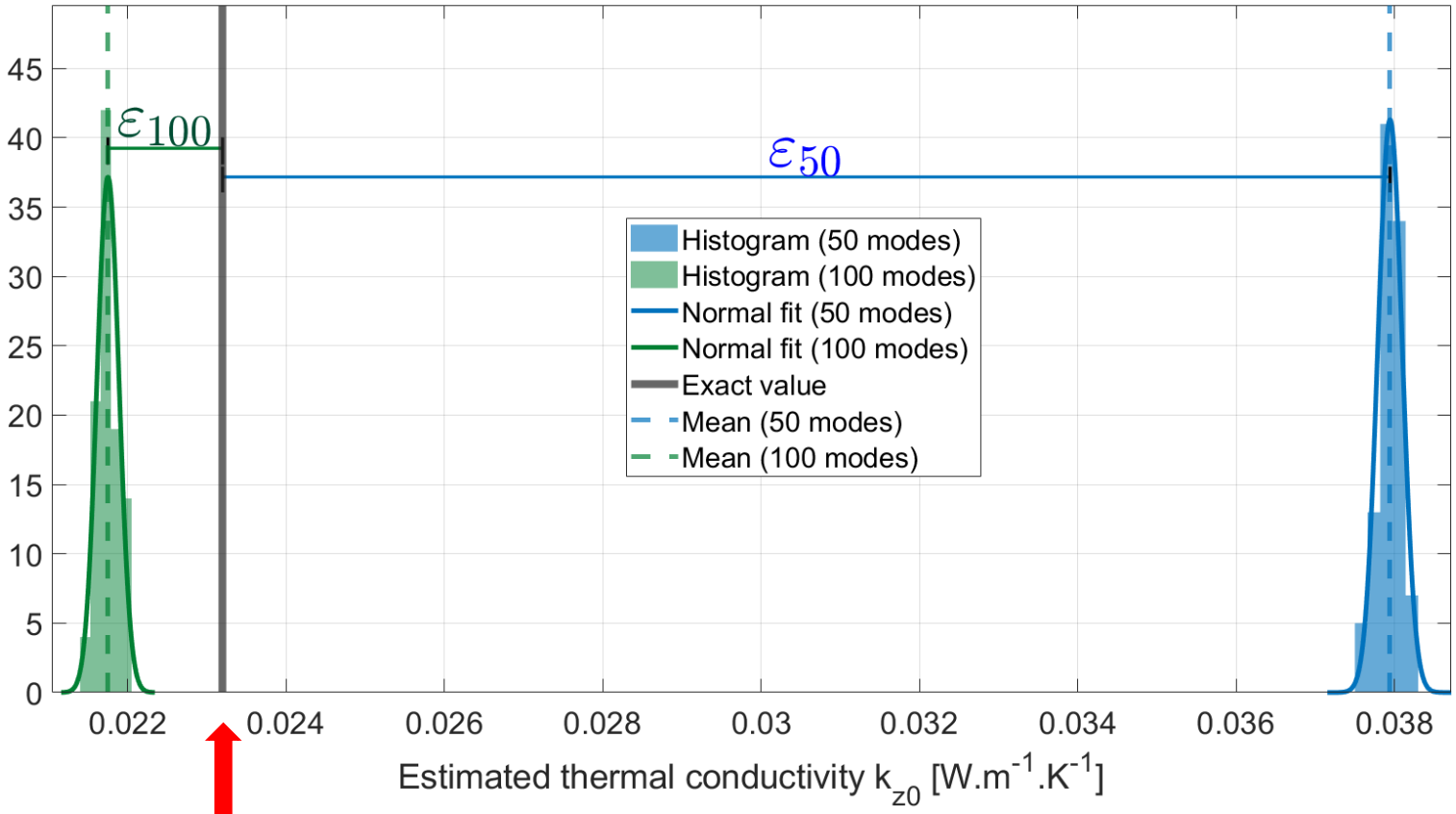
Erreur = f (Modèle,Expérience)
$= f$ (*Ordre du modèle, Bruit de mesure*)

Erreur = f $(\varepsilon \pm 3\ std)$



100 essais avec bruit gaussien (0,5 °C)

Distribution de κ_{z0} estimés pour différents nombres de modes (100 estimations)



Valeur exacte

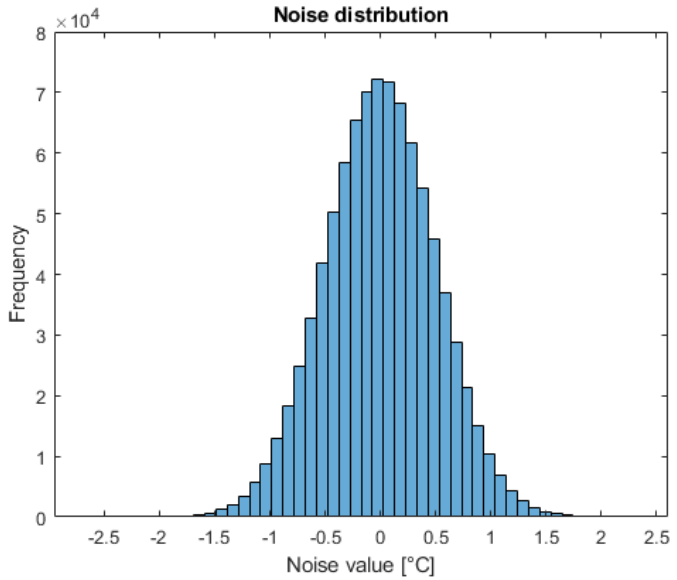
Paramètres : $\boldsymbol{\kappa_{x0}, \kappa_{x1}, \kappa_{z0}, \kappa_{z1}, c_0, h_\infty}$

4. Analyse de l'erreur d'identification

Erreur = ?

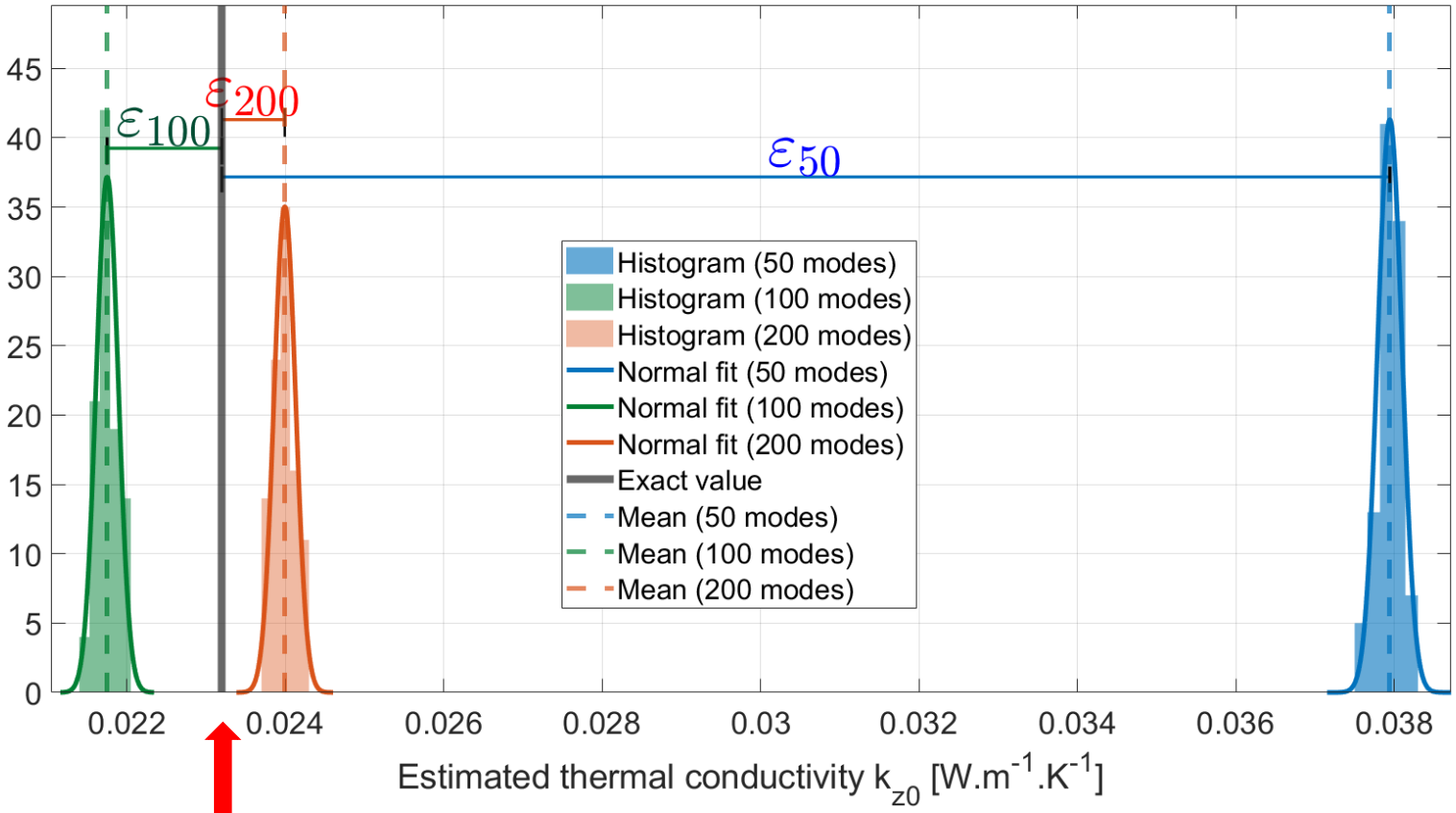
Erreur = f (Modèle,Expérience)
$= f$ (*Ordre du modèle, Bruit de mesure*)

Erreur = $f\ (\varepsilon \pm 3\ std)$



100 essais avec bruit gaussien (0,5 °C)

Distribution de κ_{z0} estimés pour différents nombres de modes (100 estimations)



Valeur exacte

Paramètres : $\boldsymbol{\kappa_{x0}, \kappa_{x1}, \kappa_{z0}, \kappa_{z1}, c_0, h_\infty}$

4. Analyse de l'erreur d'identification

Erreur = $f\ (\varepsilon\ \pm\ 3\ std)$

Paramètres : $\boldsymbol{\kappa_{x0}, \kappa_{x1}, \kappa_{z0}, \kappa_{z1}, c_0, h_\infty}$

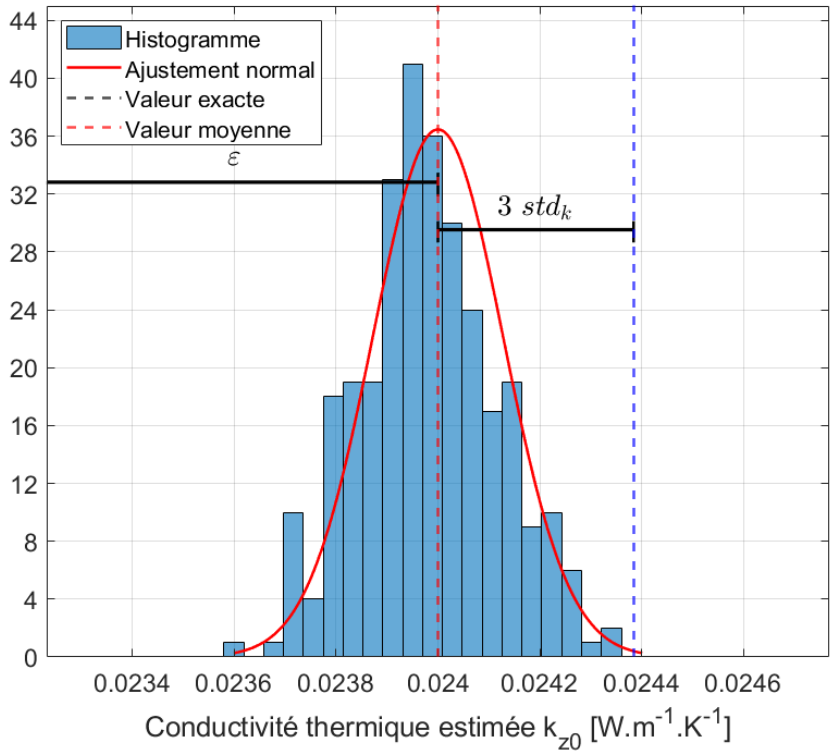
Comparaison entre les **moyennes Monte Carlo** et **l'identification sans bruit**

Méthode	$\hat{k}_{x0}$ $[mW.m^{-1}.K^{-1}]$	$\hat{k}_{x1}$ $[mW.m^{-1}.K^{-2}]$	$\hat{k}_{z0}$ $[mW.m^{-1}.K^{-1}]$	$\hat{k}_{z1}$ $[mW.m^{-1}.K^{-2}]$	$\hat{c}_0$ $[kJ.m^{-3}.K^{-1}]$	$\hat{h}_\infty$ $[W.m^{-2}.K^{-1}]$
Monte Carlo	63,6	0,507	24,0	0,790	109,09	9,78
Sans bruits	63,6	0,507	24,0	0,790	109,08	9,78

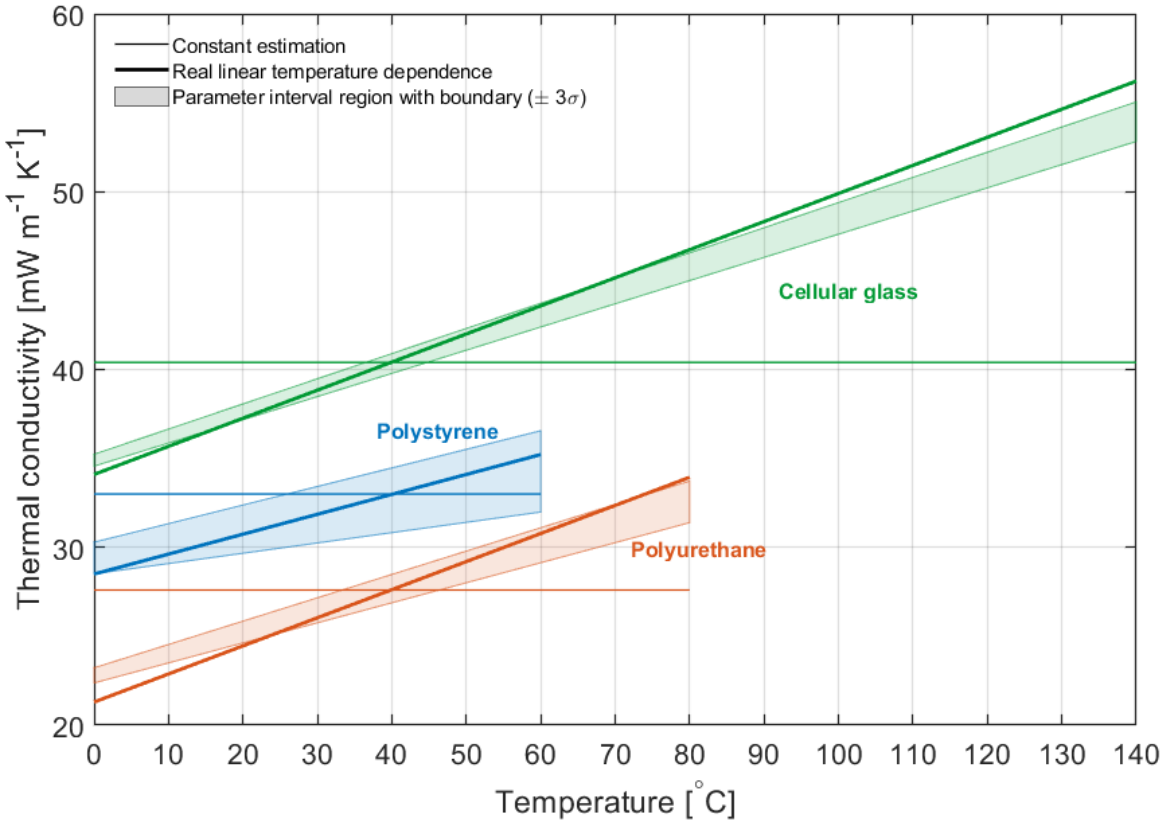
Comparaison des **écarts-types** obtenus par **Monte Carlo** et par la matrice de **variance-covariance**

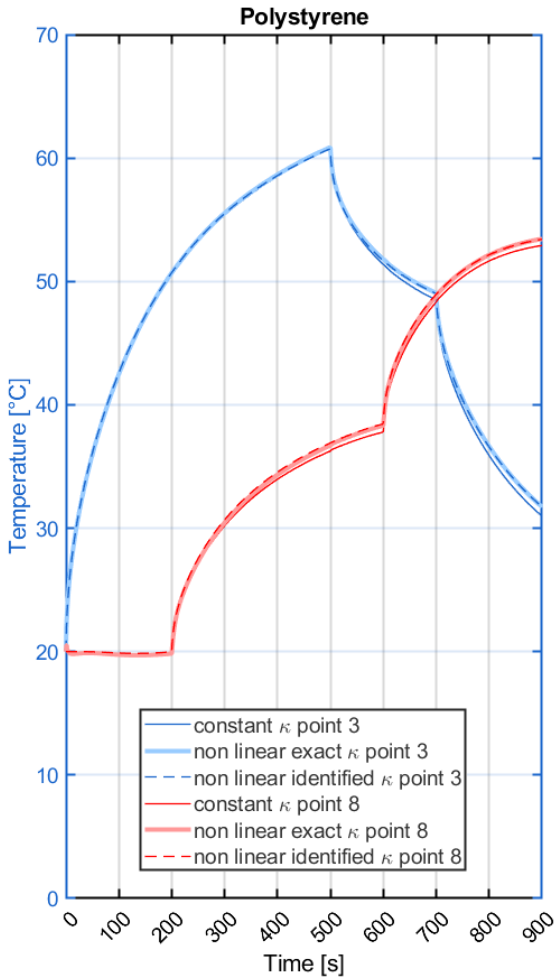
Source	std_{kx0}	std_{kx1}	std_{kz0}	std_{kz1}	std_c	std_h
Monte Carlo	1,33E-01	1,43E-03	1,37E-01	1,27E-03	4,50E-02	7,76E-03
Matrice de covariance	1,35E-01	1,37E-03	1,28E-01	1,20E-03	4,34E-02	7,35E-03

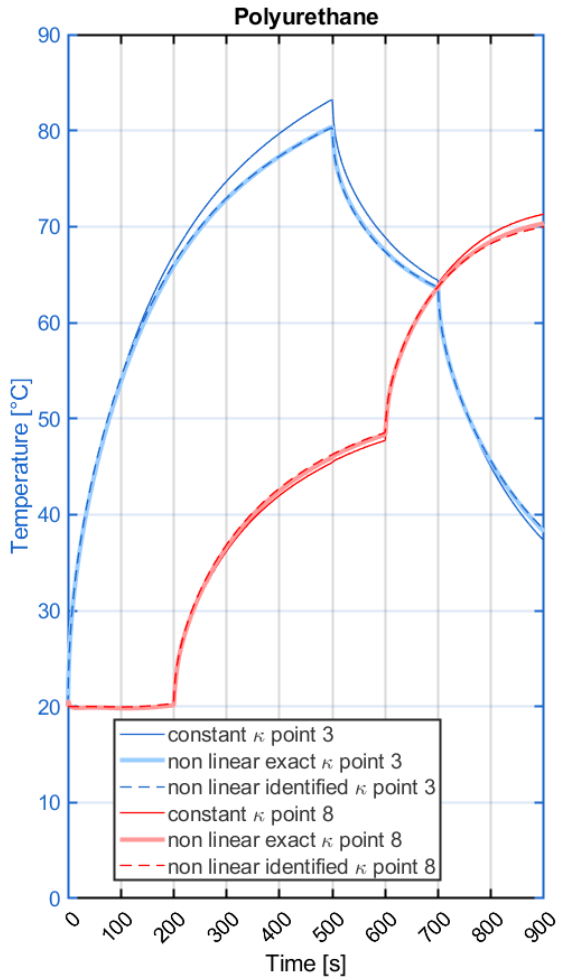
Distribution de κ_{z0} estimés pour 200 modes (300 estimations)



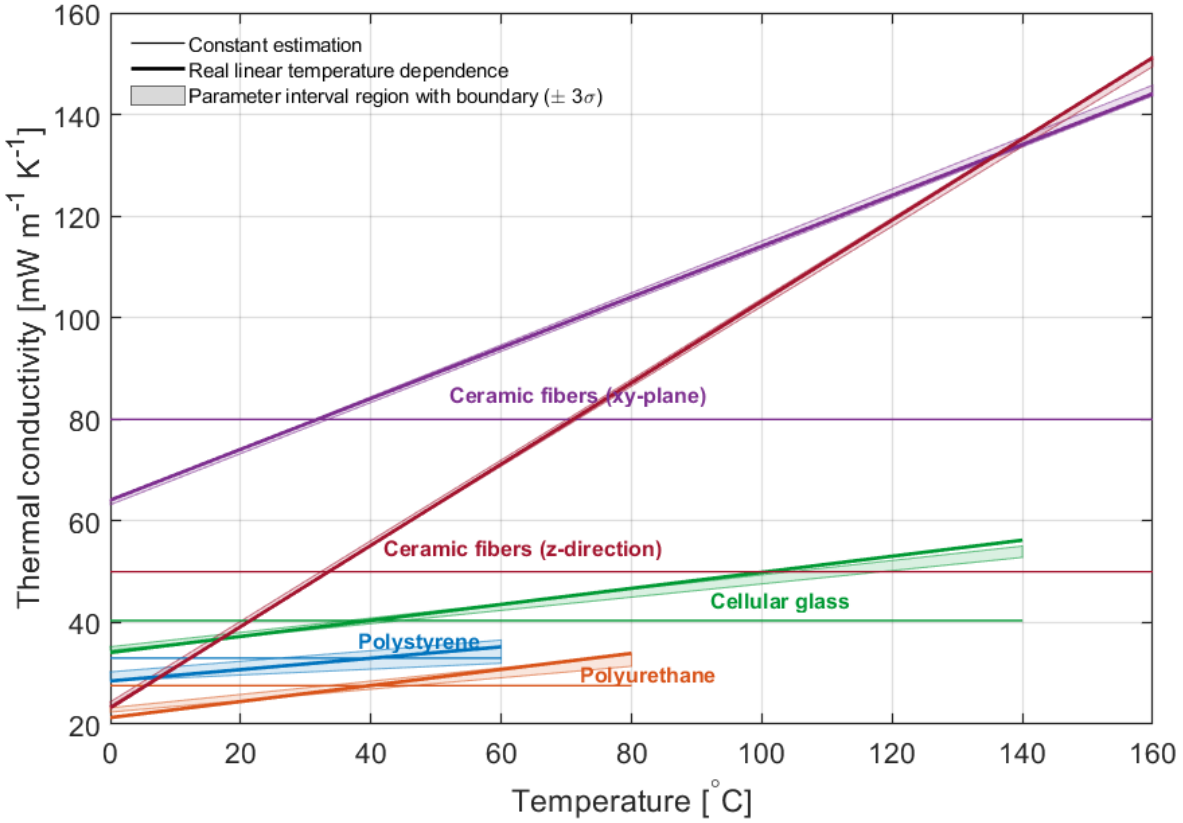
5. Résultats : $\kappa(T)$

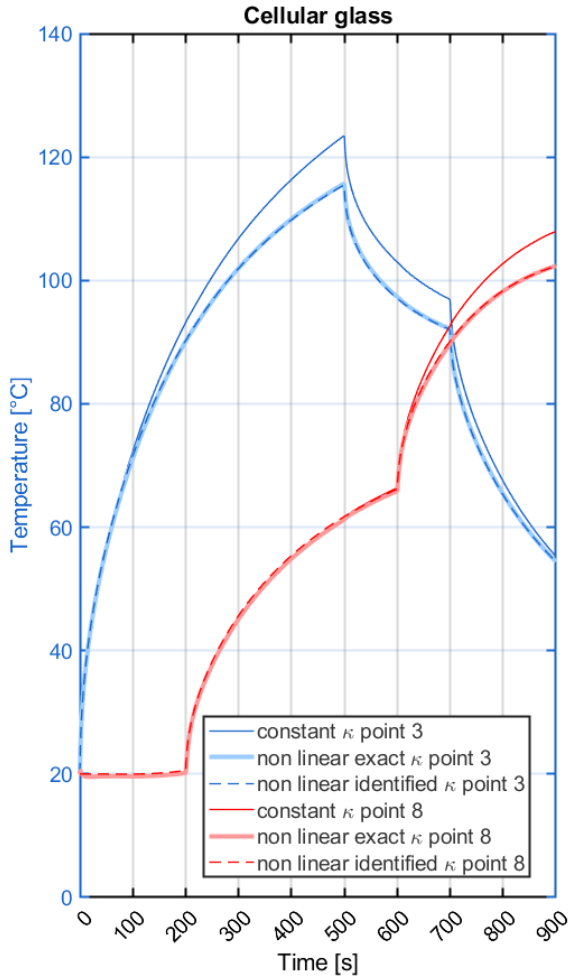


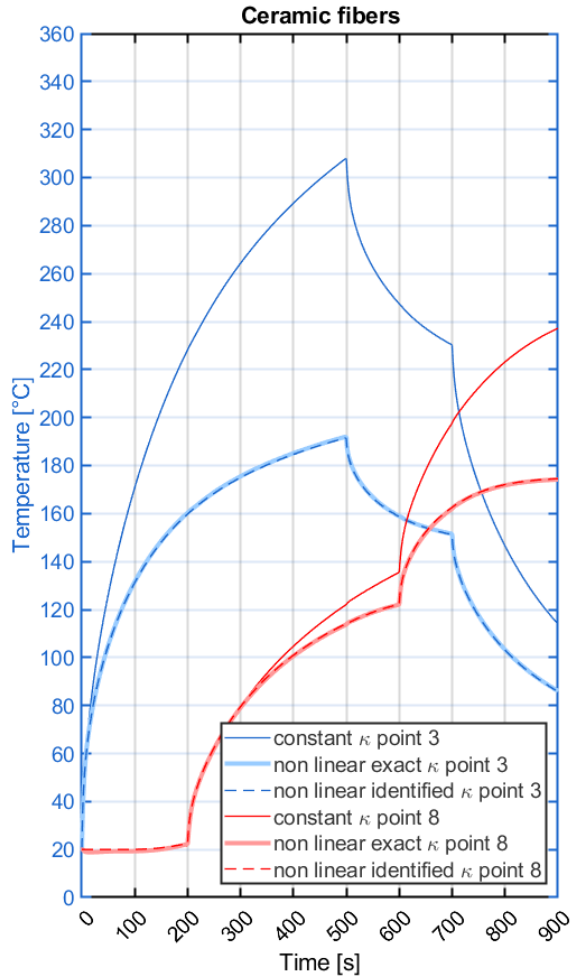




5. Résultats : $\kappa(T)$







6. Conclusions et perspectives:

Conclusions :

- ✓ Identification de propriétés thermiques thermo-dépendantes et orthotropes
- ✓ Compromis entre précision et coût de calcul
- ✓ Analyse du biais et des erreurs d'estimation

Perspectives :

- ❑ Mise en place d'une validation expérimentale
- ❑ Collaboration avec des laboratoires expérimentaux

Merci pour votre attention!