

M. Bamford,

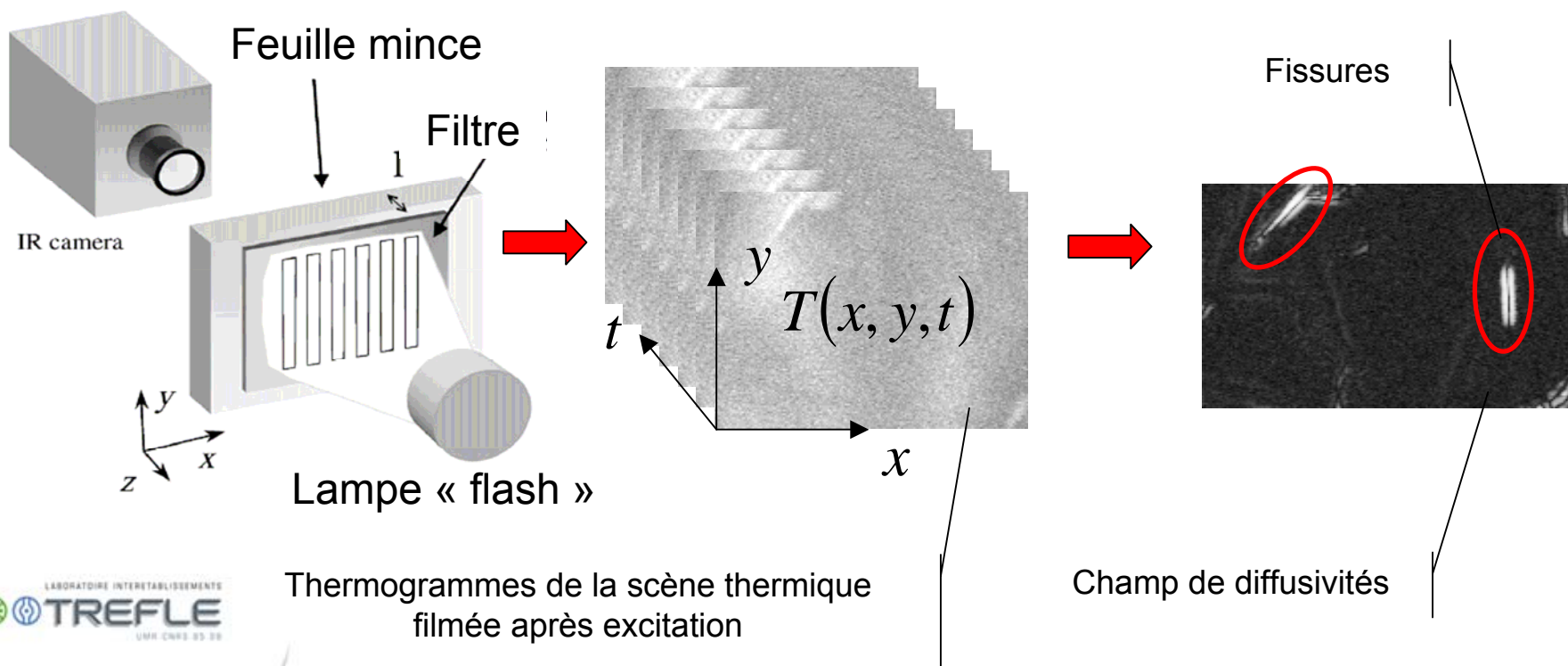
J.C. Batsale, J. Toutain, C. Pradere, A. kusiak, O. Fudym,
J. Lamon, G. Vignolles, O. Loseille, B. Humez

Thermographie Infrarouge et mesure de champs

Stratégies modales et nodales
appliquées à l'estimation de champs
de propriétés thermophysiques

Problématique

→ Comment extraire des propriétés locales pertinentes à partir d'une grande quantité d'images infrarouges en régime transitoire?



Difficultés

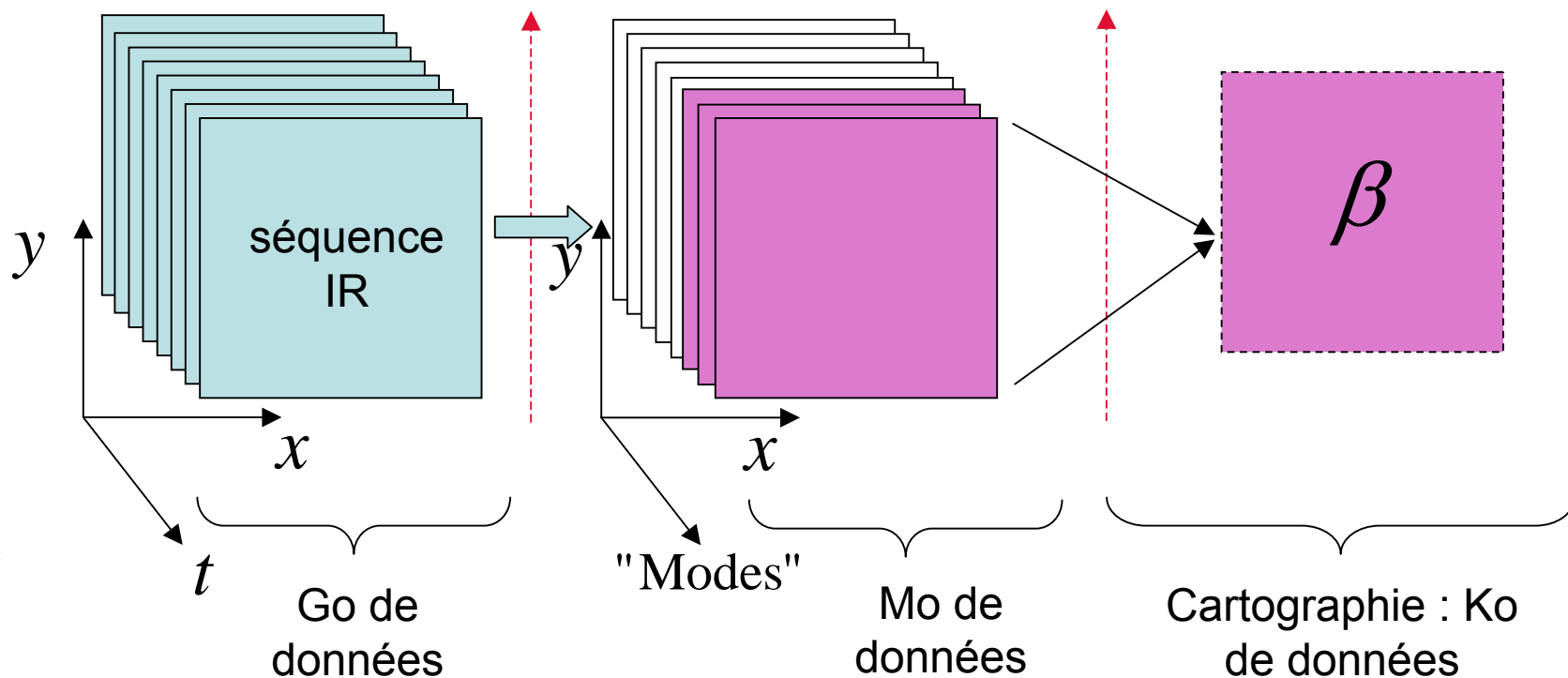
1. Estimations perturbées par la présence de bruit de mesure
2. Faible sensibilité spatiale/temporelle par rapport aux paramètres étudiés
3. Grande quantité de données à manipuler

Stratégies existantes

1. Approche modale (SVD, Ondelettes, Fourier) : Inverser un modèle dans un espace transformé
 - Permet de compresser les données, facilite l'inversion
 - Permet d'augmenter la sensibilité aux paramètres, diminuer le bruit
2. Approche nodale : Inverser un schéma aux différences finies localement
 - Adéquat pour une analyse de sensibilité: les estimations sont effectuées sur un domaine où la sensibilité est maximale
 - Adéquat pour étudier la pertinence de l'estimation après calcul (mesure de confiance)

Approche modale

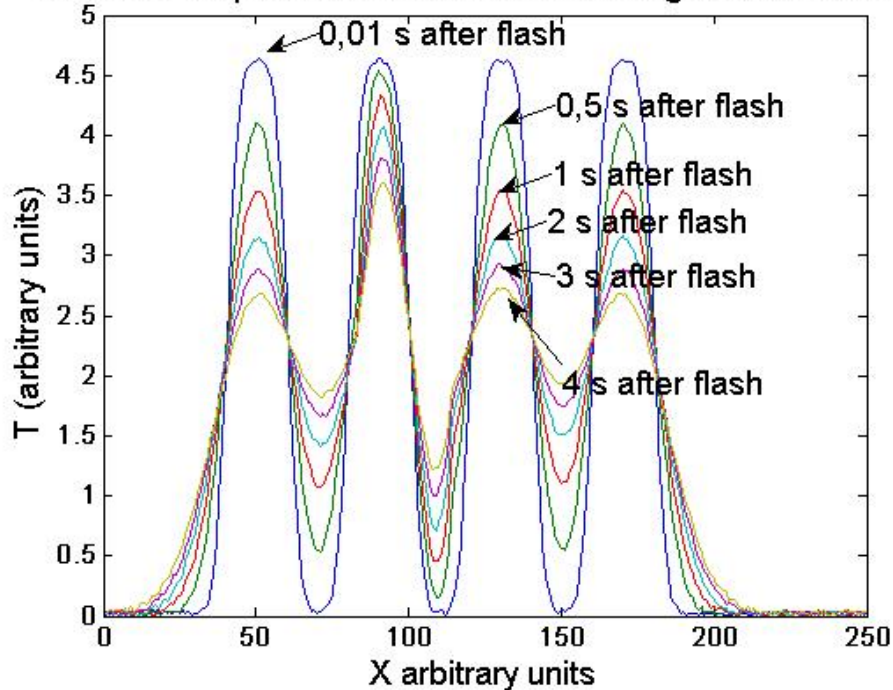
Décomposition modale: SVD, Résolution physique dans
Ondelettes, Fourier... l'espace transformé



Exemple: mesure de diffusivité

Diffusion 1D, milieu hétérogène, flux nul aux bords

Simulated 1D profiles: diffusion on a heterogeneous medium



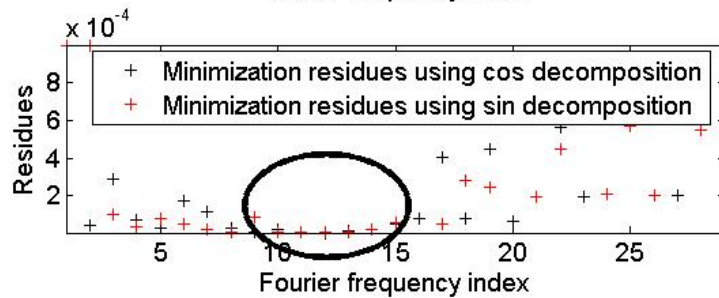
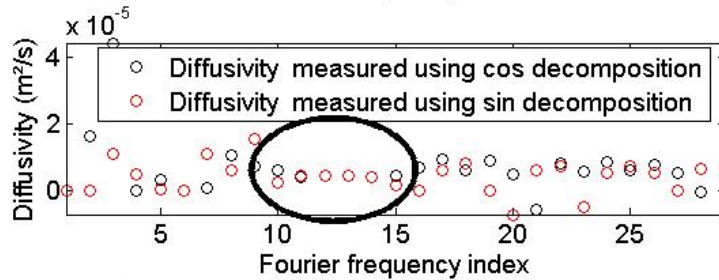
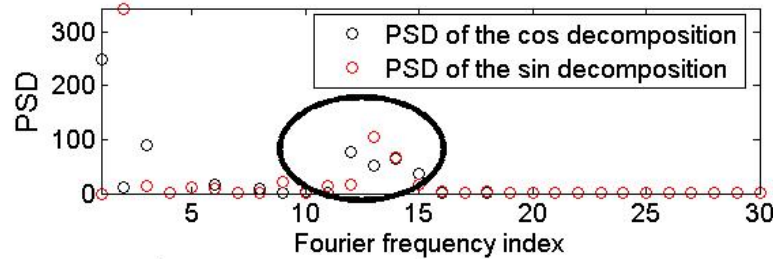
Besoin d'une diffusivité macroscopique de référence



• Approche macro: décomposer le signal en série de Fourier

$$\ln(\Theta(\alpha_n, t)) = -a_x \cdot (\alpha_n)^2 \cdot t$$

Valeur de référence



$$a_x \approx (4,6 \pm 0.1) \cdot 10^{-6} m^2 s^{-1}$$

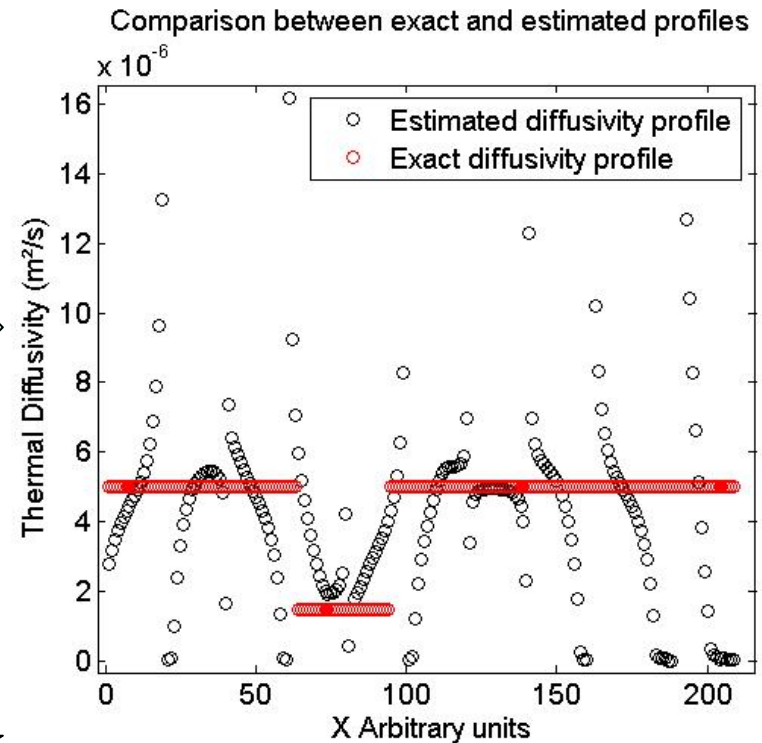
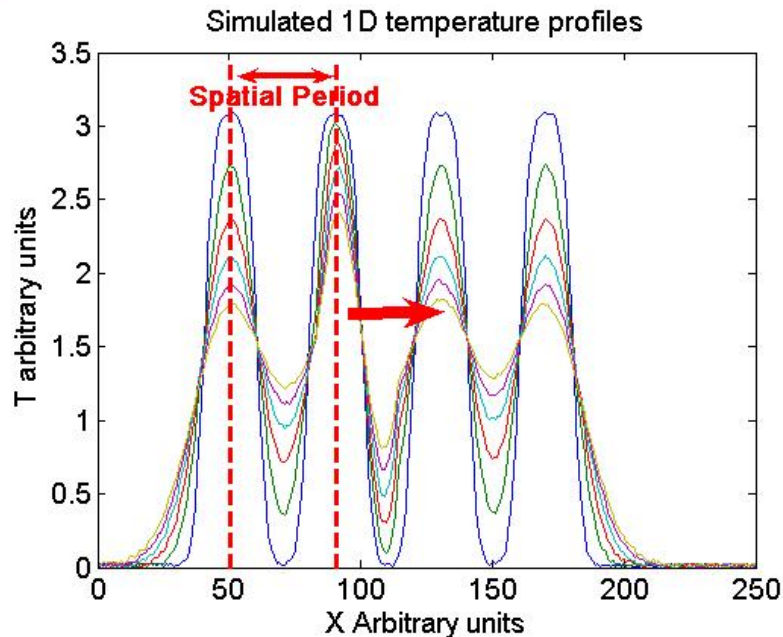


Peut on remonter à un profil de diffusivité ?



Peut on appliquer la même stratégie à une échelle locale ?

Mesures locales: Fourier



• Problème: les hypothèses pas toujours vérifiées localement (flux non nul aux bords, ...): **besoin d'une « analyse de sensibilité » locale!**

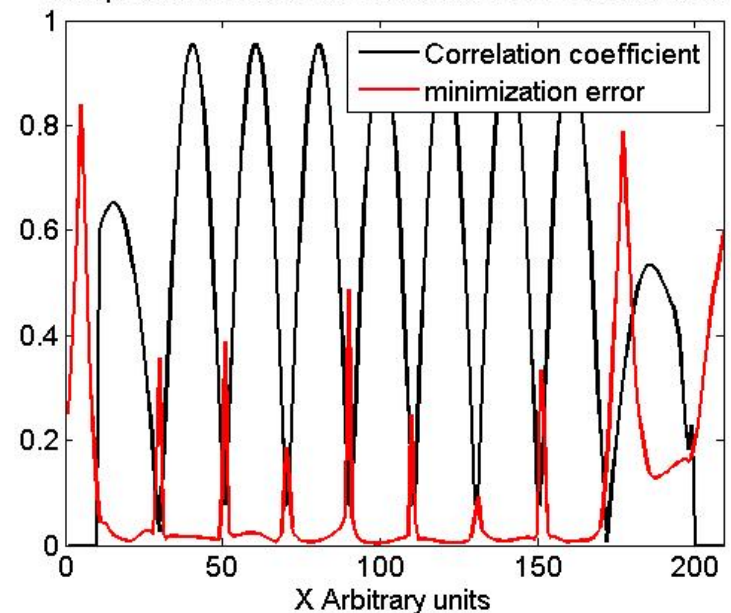
Analyse de sensibilité et corrélation

$$\Theta(\alpha_n, t) \propto \text{cov}(\cos(\alpha_n x), T(x, t))$$



$$\rho(x, t) = \text{cor}(\cos(\alpha_n x), T(x, t))$$

Comparison between correlation and minimisation error

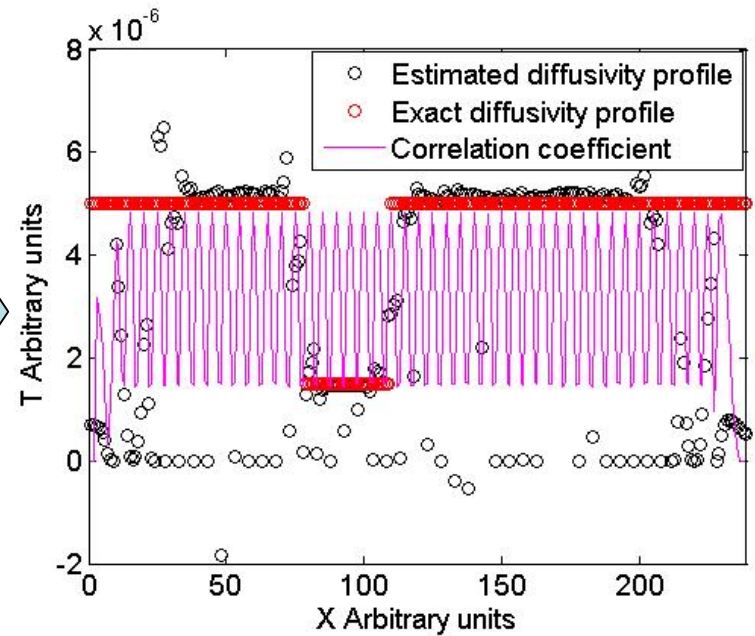
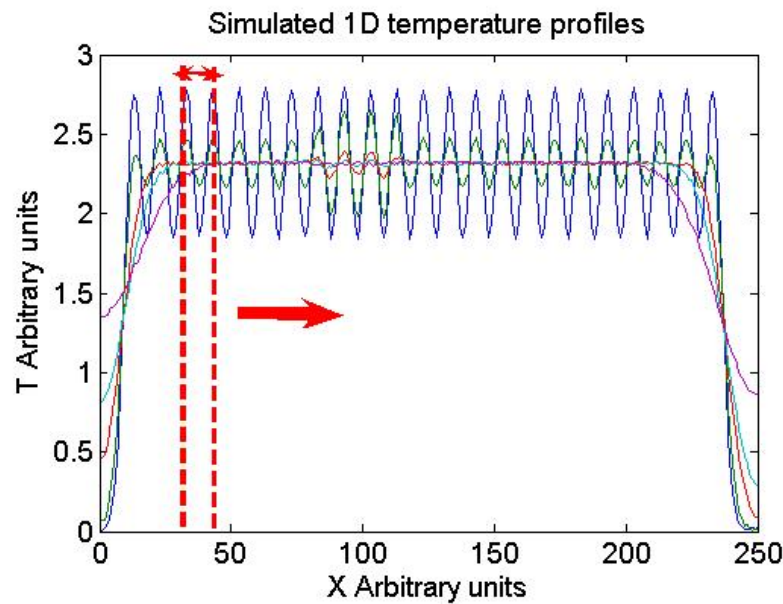


$$\rho(x, t) \approx 1 \Leftrightarrow \text{minimization error} \approx 0$$

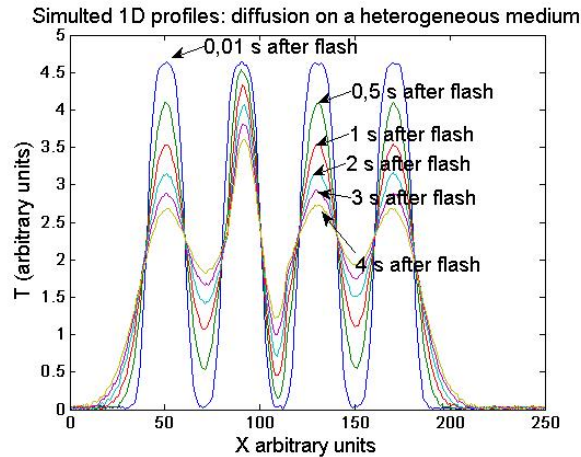


Le coefficient de corrélation donne une mesure à posteriori de la justesse du modèle

Mesures locales: Fourier



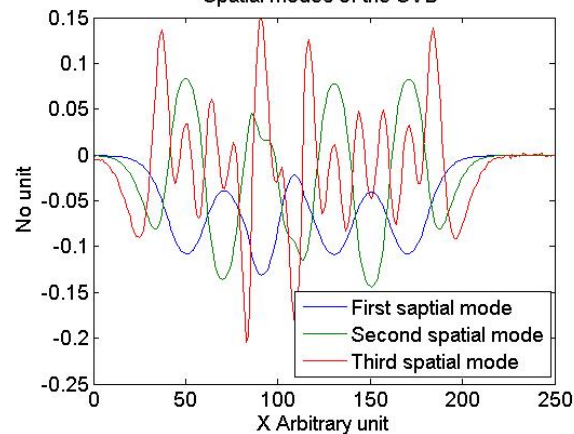
Décomposition en valeurs singulières



$$T(x,t) \stackrel{SVD}{=} \sum_k U_k(x) \cdot \lambda_k \cdot V_k(t)^T$$

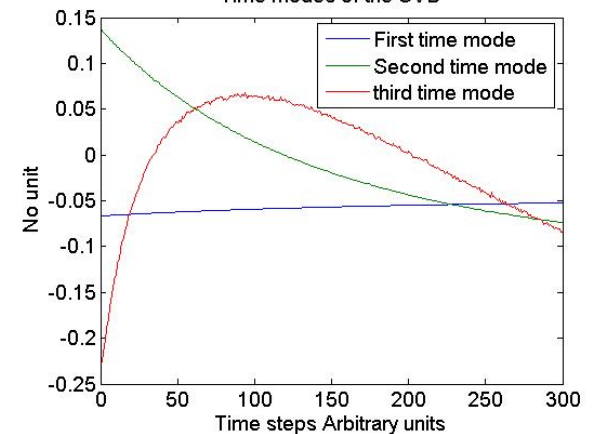
$$U_k(x) \quad k = 1..3$$

Spatial modes of the SVD



$$V_k(t) \quad k = 1..3$$

Time modes of the SVD



Modèle équivalent

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$



$$a(x) \cdot \frac{\partial^2 U_k(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho c} \frac{\partial \lambda(x)}{\partial x} \cdot \frac{\partial U_k(x)}{\partial x} = \sum_{j=1}^{2..3} U_j(x) \cdot \frac{\lambda_j}{\lambda_k} \cdot \left(\frac{\partial V_j^T}{\partial t} \cdot V_k \right)$$



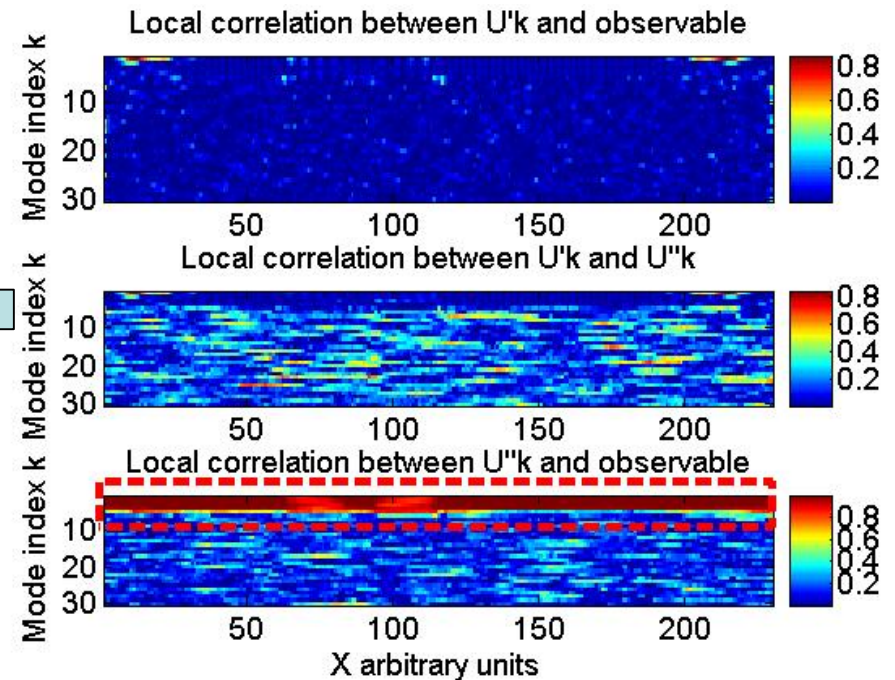
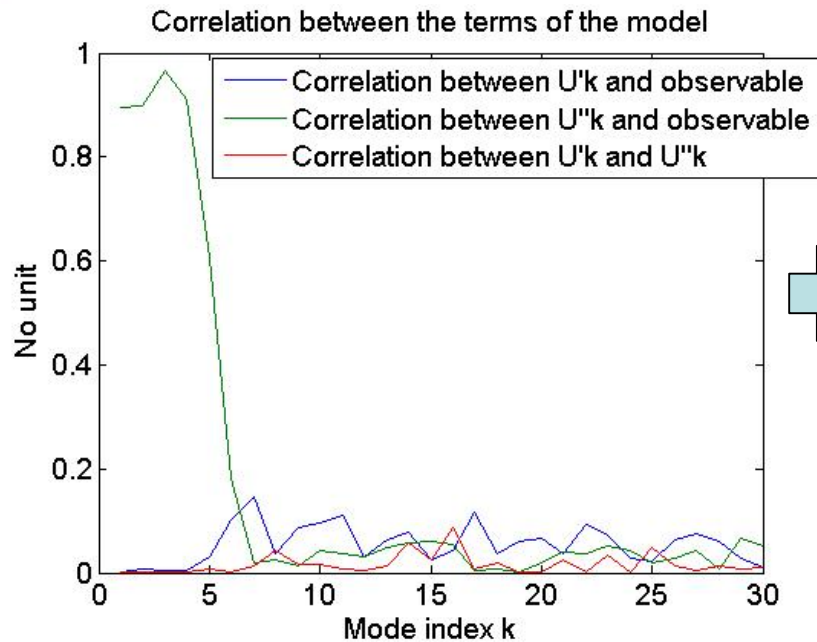
$$a(x) \cdot \ddot{U}_k(x) + \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{\partial \lambda(x)}{\partial x} \dot{U}_k(x) = \tilde{U}_k(x) \quad k = 1..N$$

Problème: estimation de plusieurs paramètres, et quel mode k choisir pour l'estimation ?



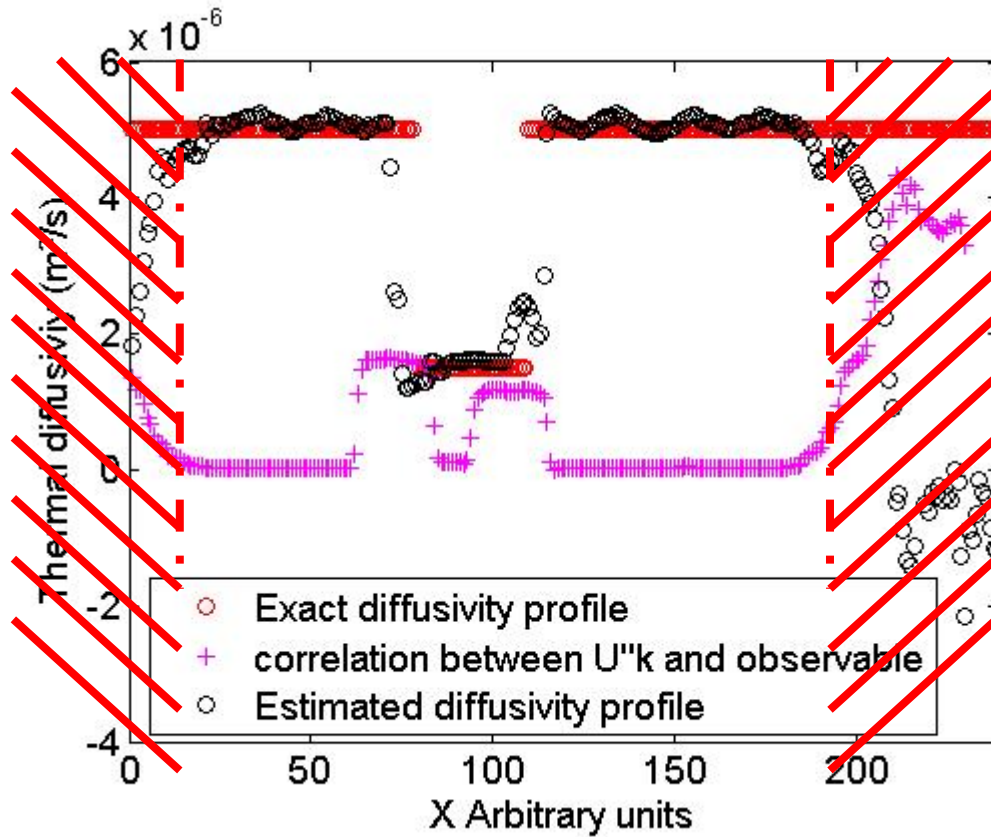
Besoin d'une analyse de sensibilité pour chaque paramètre et chaque mode: analyse de la **corrélation des termes du modèle dans l'espace transformé**

Analyse de sensibilité dans l'espace transformé



Le modèle peut se simplifier, seuls les cinq premiers modes de la décomposition interviennent !

Résultats

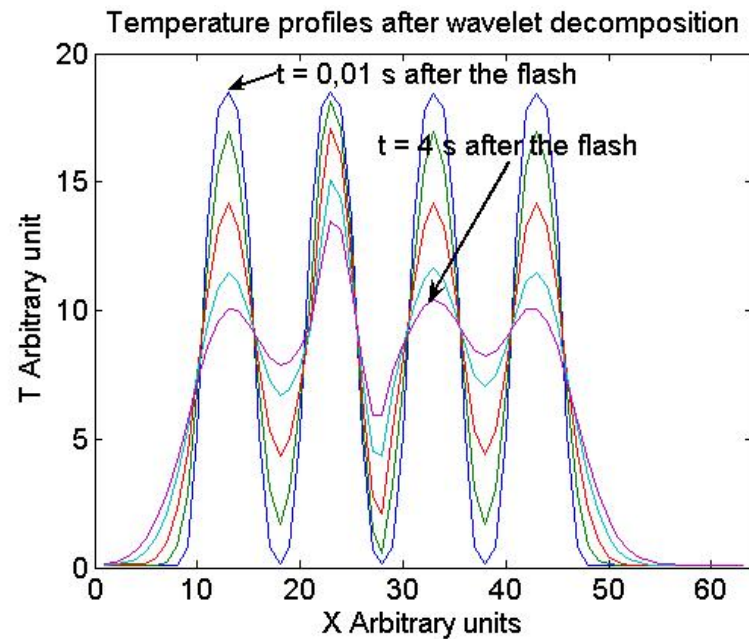


Ondelettes

$\varphi^j(T)$ Approximation à l'échelle j de T

$\psi^j(T)$ Résidus à l'échelle j

$\varphi^j(T)$ et $\psi^j(T)$ sont compressés $2^{2 \cdot j}$ fois par rapport à T



Modèle équivalent

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$

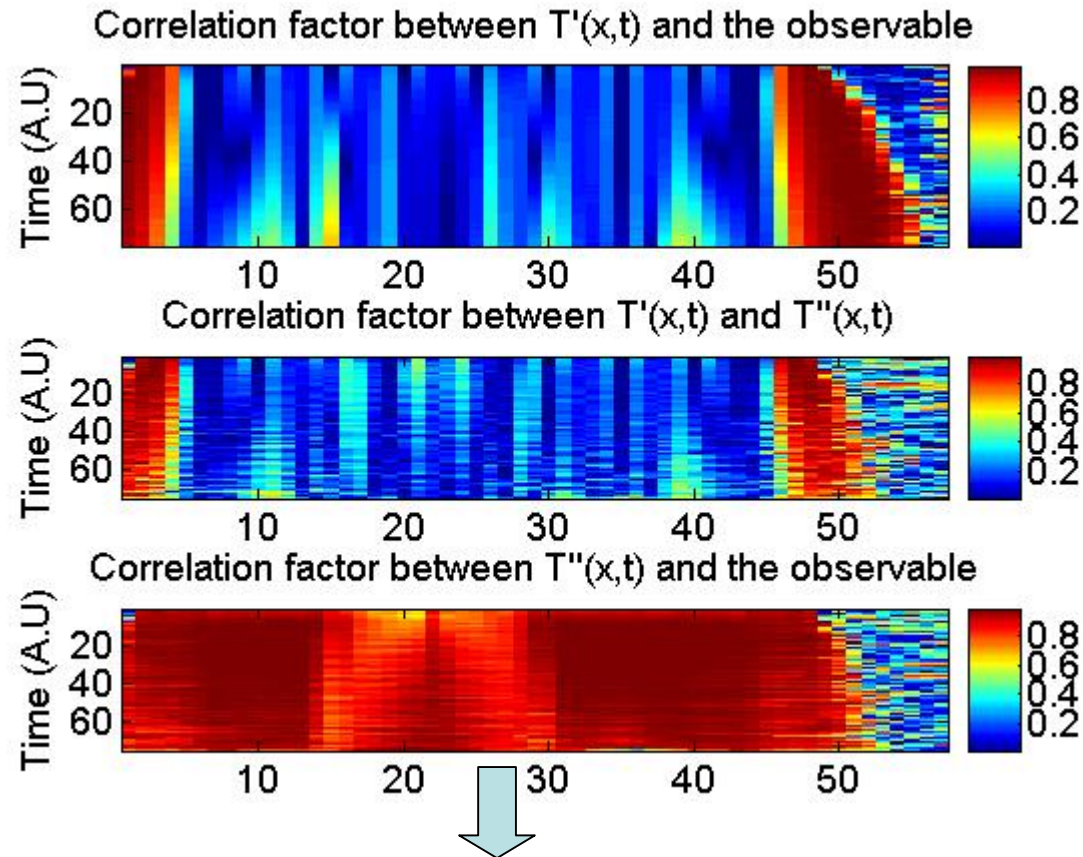


$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\tilde{\lambda}(x) \cdot \frac{\partial \varphi^j}{\partial x} \right) = \rho c \cdot \frac{\partial \varphi^j}{\partial t}$$



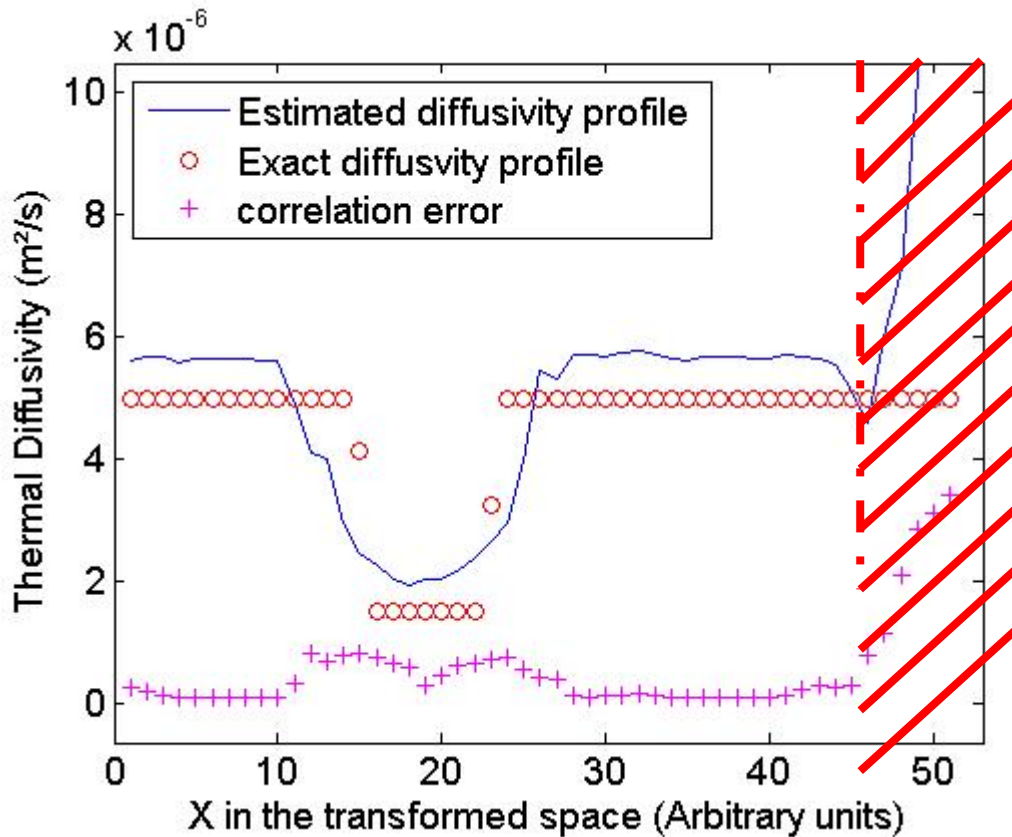
Besoin d'une analyse de sensibilité pour simplifier le modèle et déterminer une zone de sensibilité optimale dans l'espace transformé: L'analyse de la **corrélation des termes du modèle dans l'espace transformé**

Analyse de sensibilité dans l'espace transformé

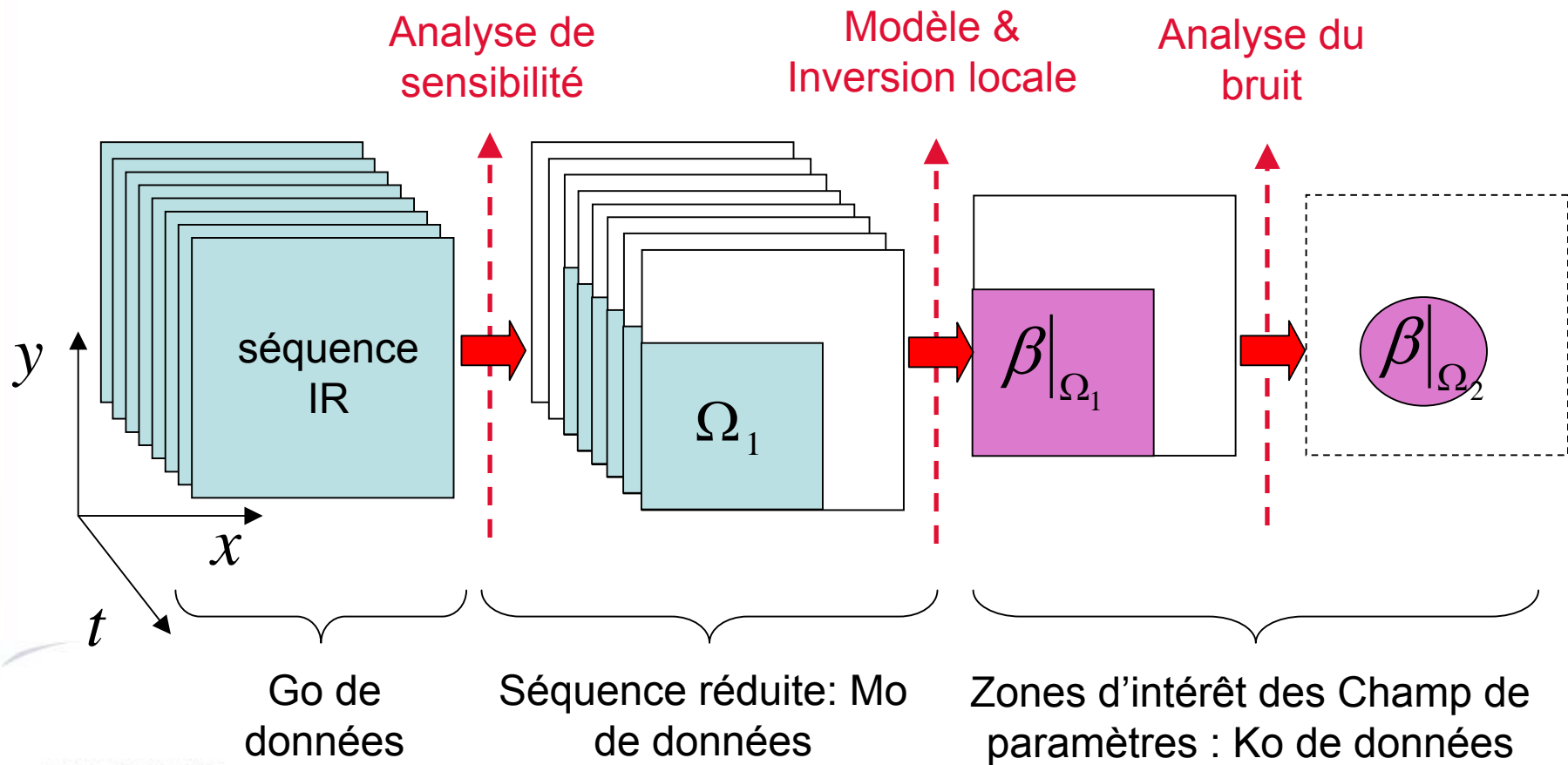


Le modèle peut se simplifier, et la sensibilité est optimale sur tout l'intervalle de temps et quasiment tout l'espace

Résultats



Approche nodale



Approche nodale

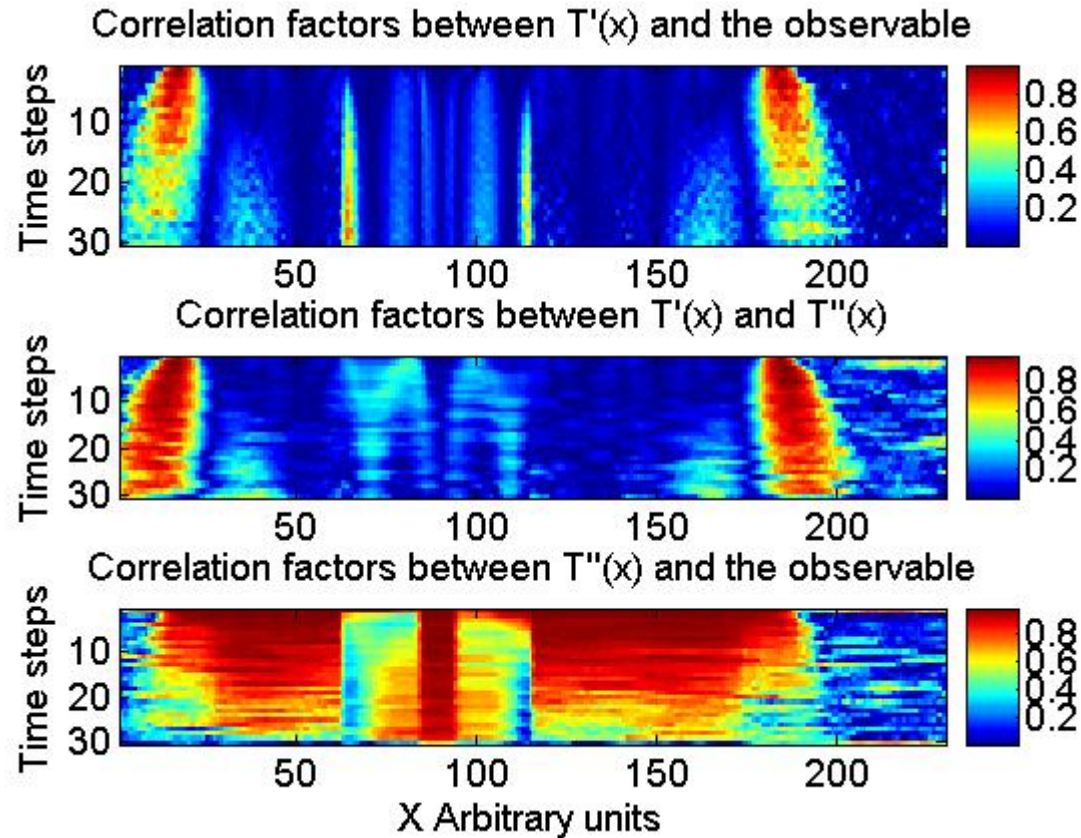
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(x) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t}$$



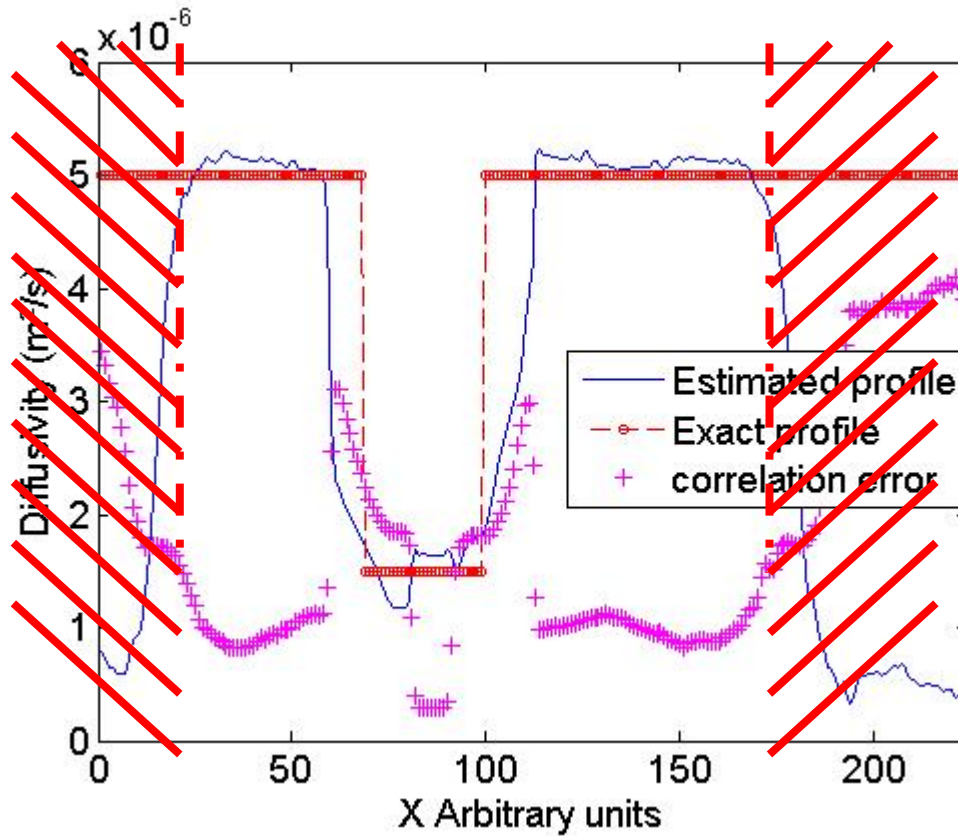
Besoin d'une analyse de sensibilité pour déterminer les zone spatio-temporelles de sensibilité maximale: Analyse de la **corrélation des termes du modèle**

$$\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \frac{\partial T}{\partial t}$$

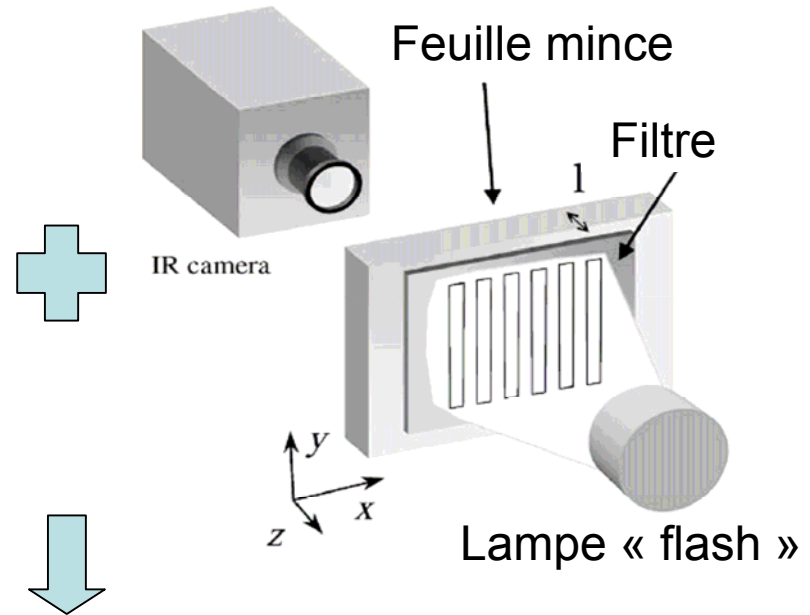
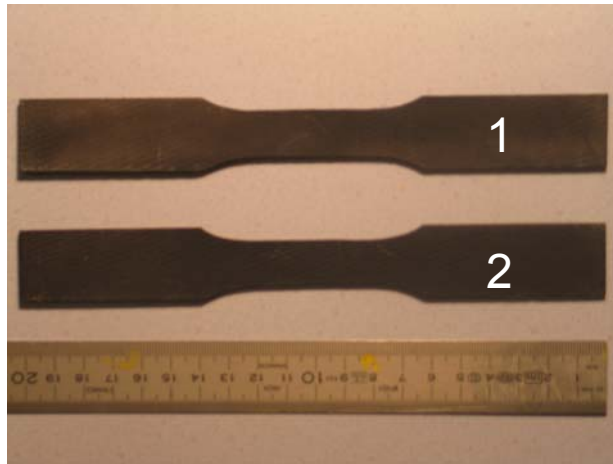
Analyse de sensibilité



Résultats



Exemple: éprouvette Sic/Sic sous contrainte



1 s après le flash

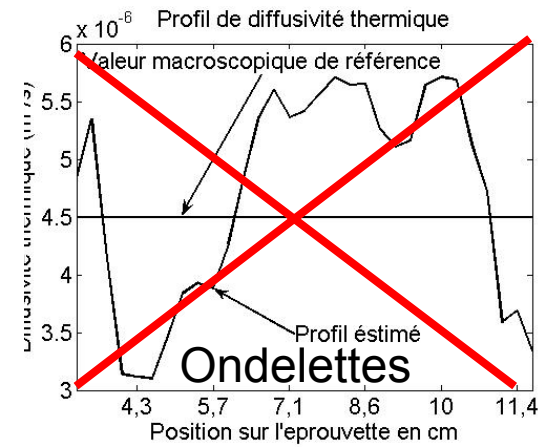
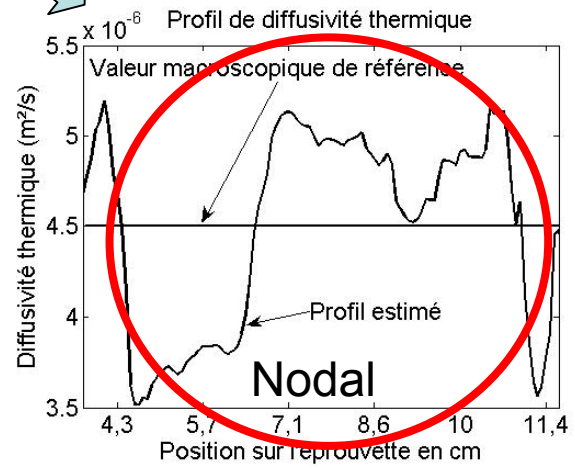
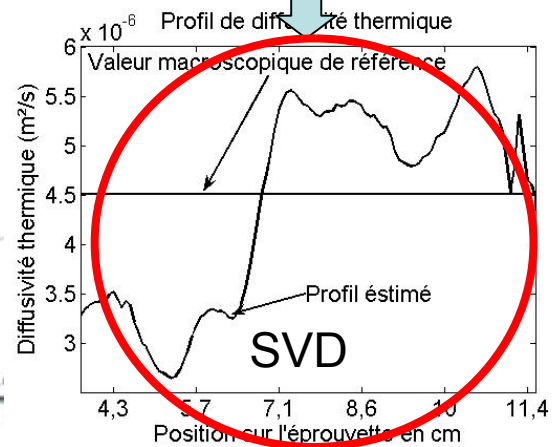
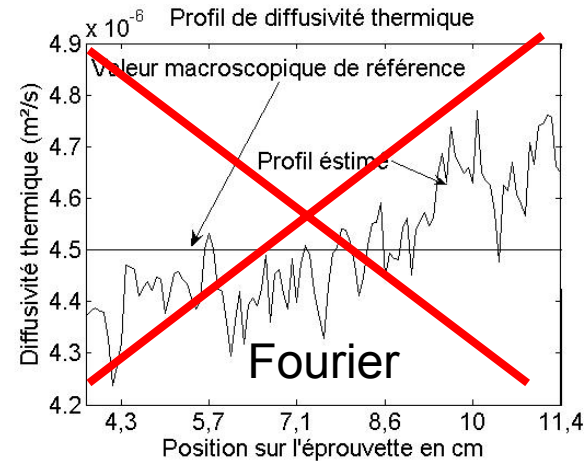
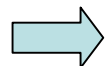
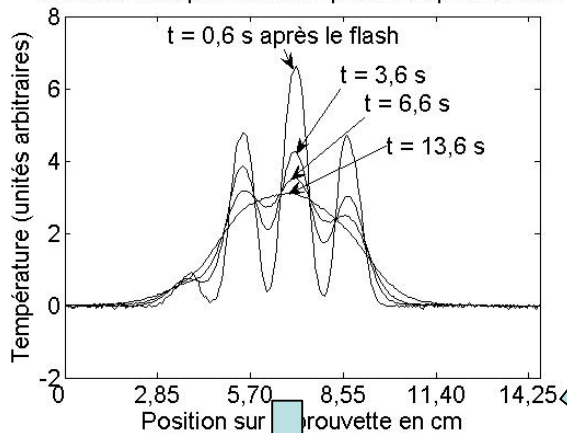


13 s après le flash



Calibration sans contrainte

Evolution des profils de température après le flash



Application avec contraintes: nodal

Résultats expérimentaux confidentiels

- La mesure de diffusivités est un indicateur pertinent d'endommagement (la diffusivité longitudinale locale peut être reliée à une densité locale de microfissures)

Application avec contraintes: SVD

Résultats expérimentaux confidentiels

- Mêmes résultats que pour l'analyse nodale: validation!
- Nécessité d'un diagnostic 2D pour une meilleure compréhension des phénomènes de fissuration locale

Comparaison par rapport à un signal de référence

$$I(x, y) = \int_t T(x, y, t) f(t) dt / \sqrt{\int_x \left(\int_t T(x, y, t) f(t) dt \right)^2} dx \quad f(t) = T_{moy}(t), \dots$$

Résultats expérimentaux confidentiels

Evolution « relative » des cartographies

Résultats expérimentaux confidentiels

Interprétation

Résultats expérimentaux confidentiels

- La mesure de diffusivité locale permet une analyse de la fissuration des composites sous contrainte, couplée à une analyse modale des séquences infrarouges elle permet de bons diagnostics d'endommagement
- Un dispositif « flash » couplé à des méthodes robustes permet d'éviter les méthodes actuelles coûteuses pour mesurer la microfissuration

Autre application: l'oignon

Matériau à faible coût (1 €/ kg)

Milieu hétérogène (quasi périodique)

Dimension caractéristique cohérente avec IR

Physique adaptée à cette étude : Couplage thermique + transfert de masse

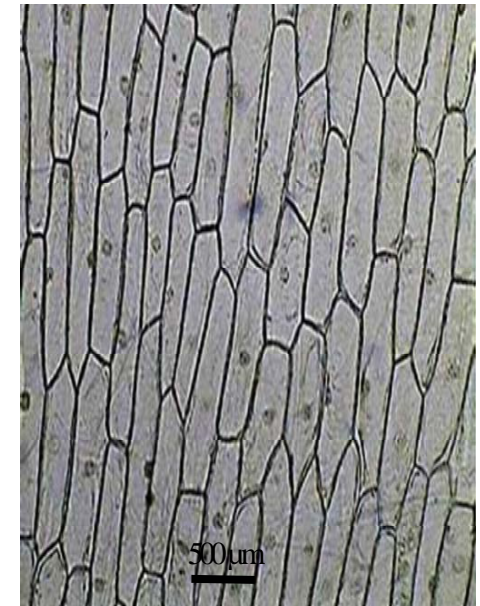
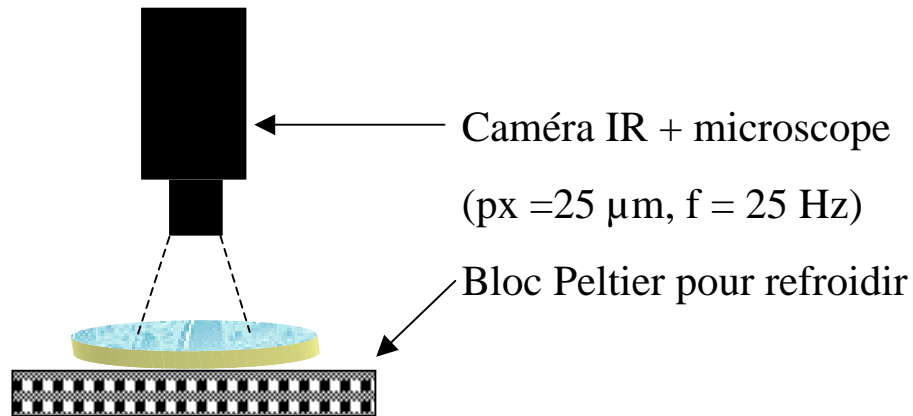
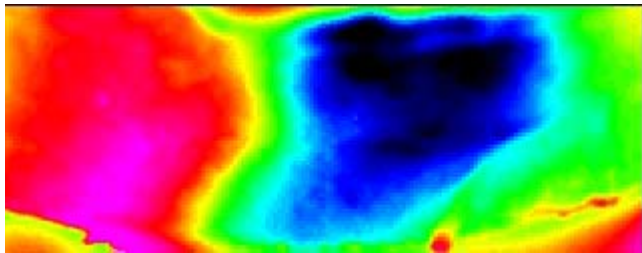
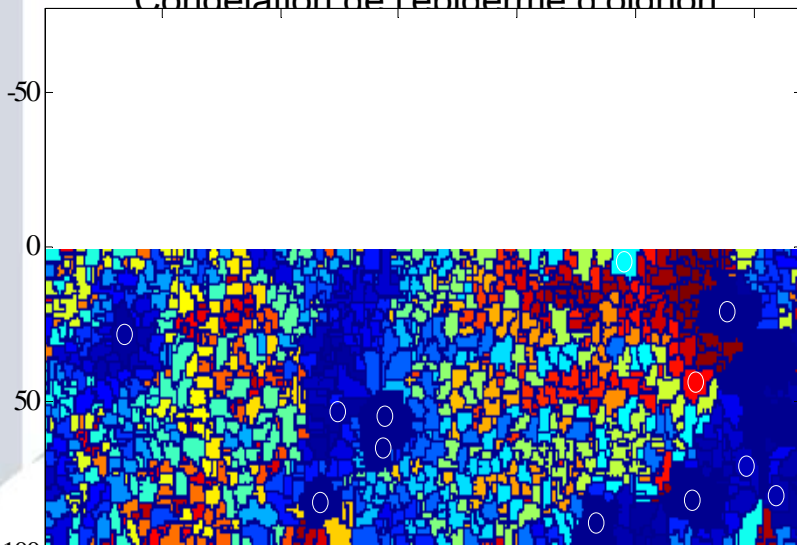


Image microscope visible (x10)
d'un épiderme d'oignon

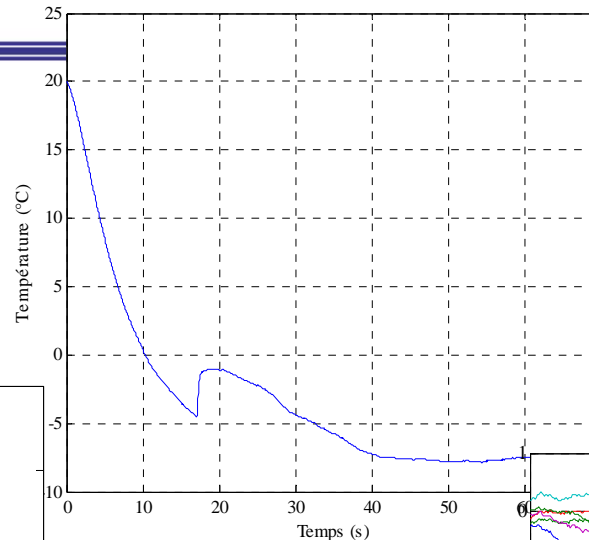
Etude des transferts entre cellules



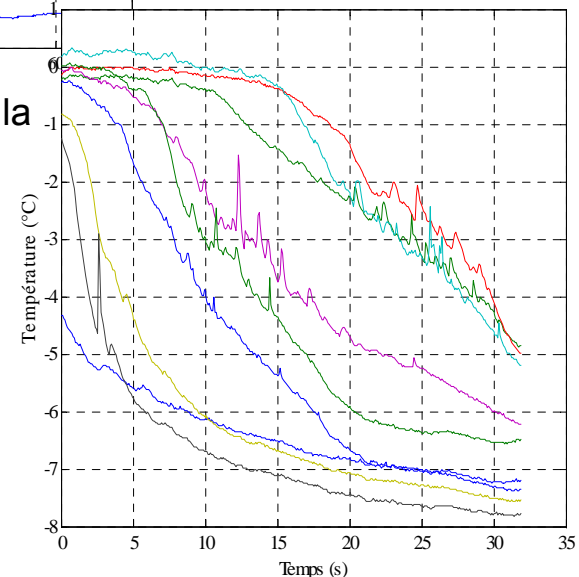
Billes détectées
Congélation de l'épiderme d'oignon



Localisation des cellules



Evolution temporelle de la température moyenne



Evolutions temporelles des températures de plusieurs cellules

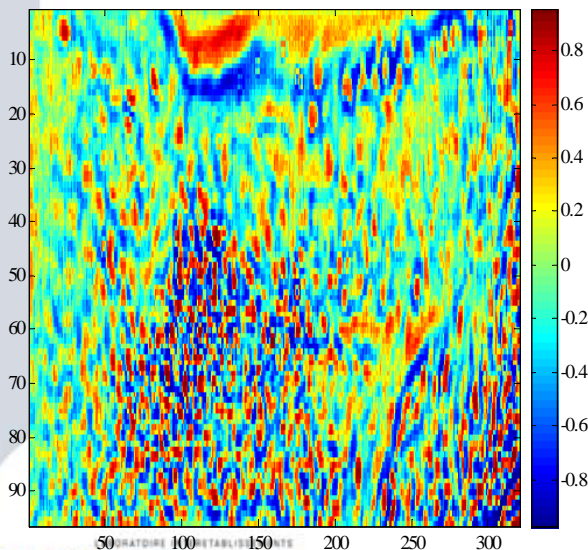
A l'échelle du pixel: besoin d'une analyse de sensibilité

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial T_{i,j}^0}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial T_{i,j}^k}{\partial t} \\ \vdots \\ \frac{\partial T_{i,j}^N}{\partial t} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta T_{i,j}^0 & T_{i,j}^0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta T_{i,j}^k & T_{i,j}^k & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta T_{i,j}^N & T_{i,j}^N & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} a \\ -H \\ \Phi \end{pmatrix}$$

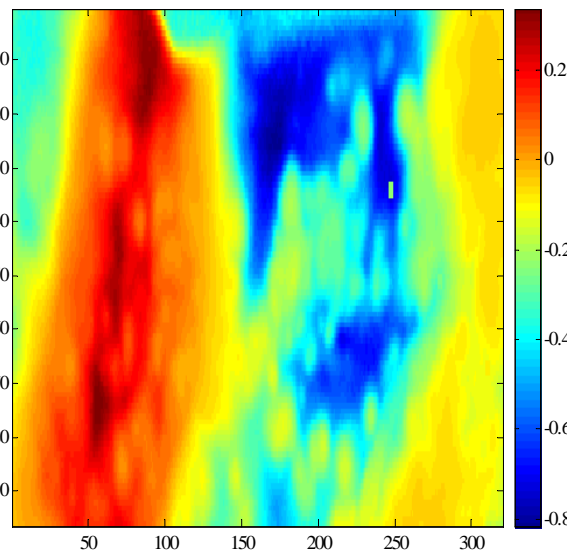
D'où la matrice des sensibilités



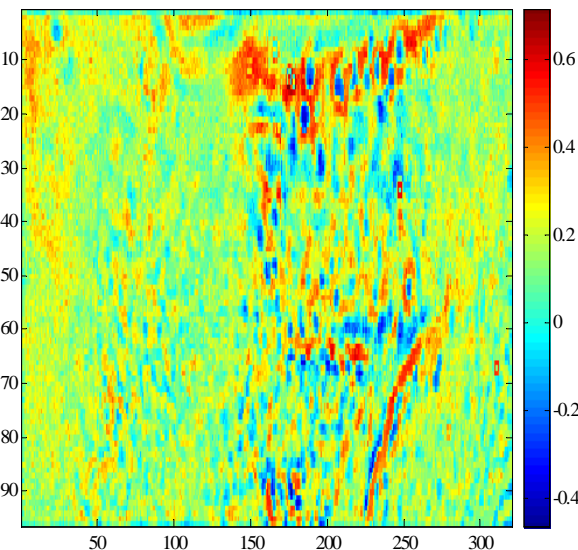
$$\begin{bmatrix} \sum_k \Delta T_{i,j}^2 & \sum_k \Delta T_{i,j} T_{i,j} & \sum_k \Delta T_{i,j} T_{i,j} \\ sym & \sum_k T_{i,j}^2 & \sum_k T_{i,j} T_{i,j} \\ sym & sym & \sum_k T_{i,j}^2 \end{bmatrix}$$



Coefficient de corrélation entre T et Laplacien



Coefficient de corrélation entre T et dTt



Coefficient de corrélation entre Laplacien et dTt

Conclusions & perspectives

La **compression** du signal, et l'**augmentation de la sensibilité** aux paramètres estimés permettent de remonter à des **propriétés physiques locales**, et d'observer des phénomènes à des **échelles** de plus en plus **petites** sans une très bonne **connaissance de la physique à priori**. L'analyse peut être faite de plusieurs façons différentes, de façon à **recouper les résultats**, à l'aide de méthodes intégrales **robustes**.



- Les valeurs estimées restent des valeurs « équivalentes »