



LABORATOIRE ENERGETIQUE ET PHENOMENES DE TRANSFERT

Résolution de problèmes thermiques inverses
à partir de modèles issus de l'identification de système non entier :

Application à l'estimation du flux de chaleur dans un outil d'usinage du bois

A. Kusiak, J.L. Battaglia

La coupe du bois

Enlèvement de matière par mouvement relatif de l'outil par rapport à la pièce

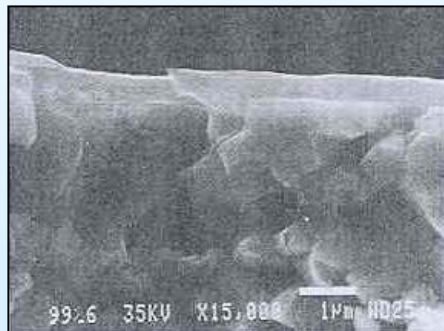


- Matériau hétérogène
- Isolant

Outils en acier et en carbure

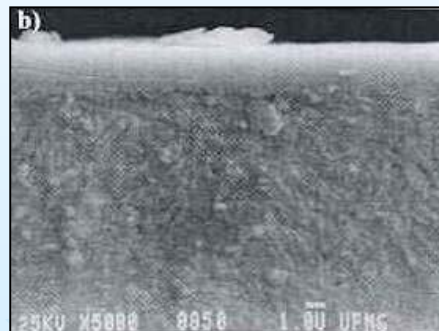
Le revêtement des outils pour l'usinage du bois et de ses dérivés

- Revêtements PVD

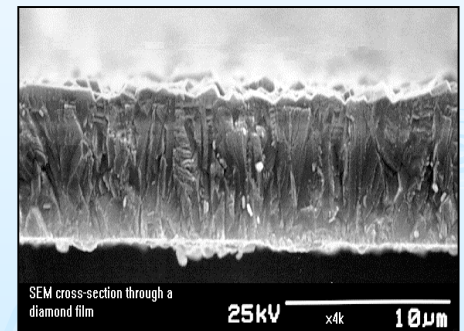


TiN 0,5~2 µm

- Revêtements CVD



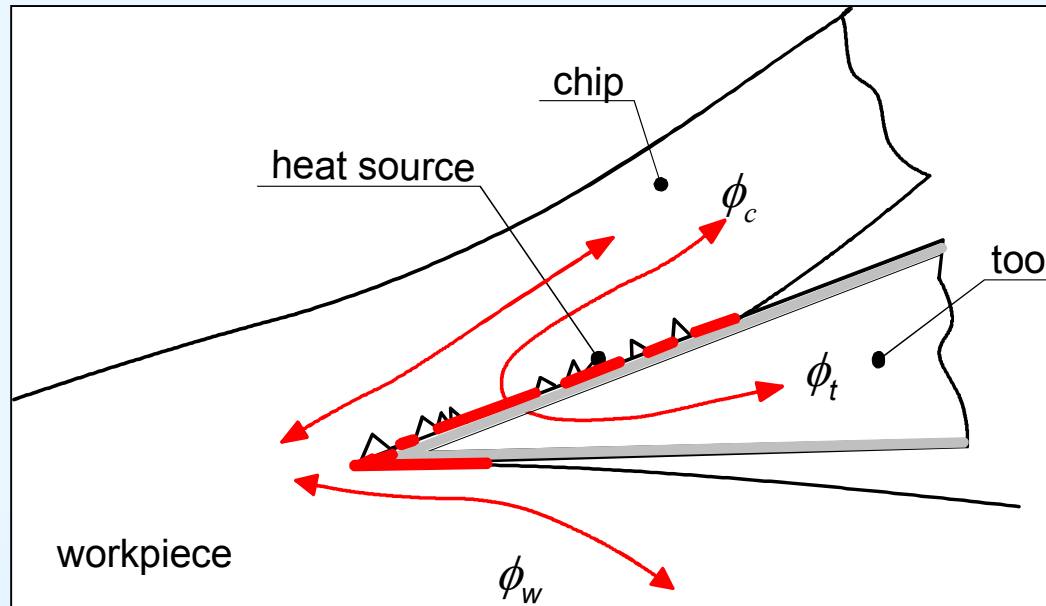
CrN ~2 µm



Diamant 5~20 µm

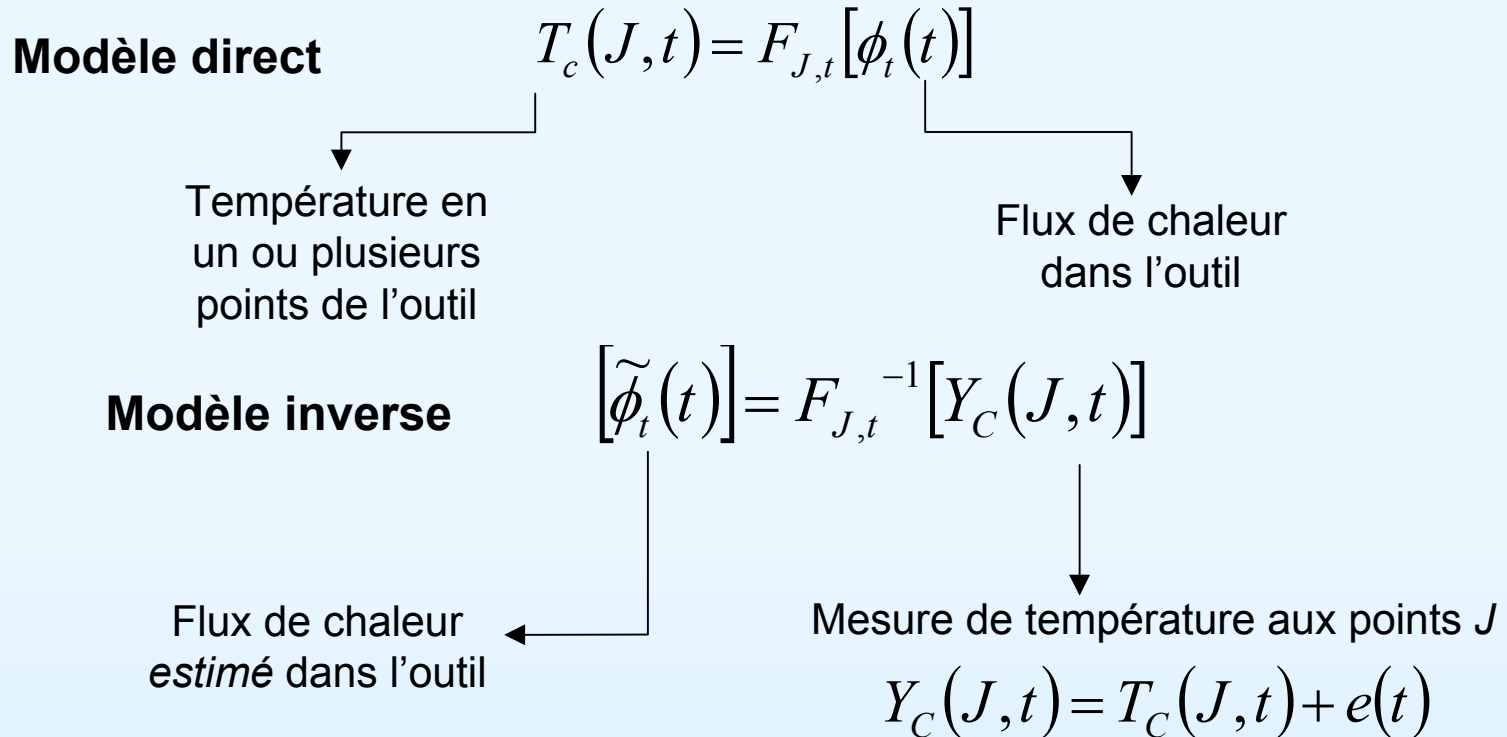
Mais aussi: TiAlN, TiCN, TiC, Al₂O₃...

Objectif: Evaluer le rôle de revêtements sur le comportement thermique des outils pendant l'usinage – l'indicateur est le flux de chaleur dans l'outil



Démarche: Mesure directe impossible. On réalise des mesures de température dans l'outil – estimation du flux par méthode inverse

Résolution du problème thermique inverse de diffusion de la chaleur dans l'outil



2 problèmes à résoudre :

- **Métrologie adaptée**
- **Modélisation**

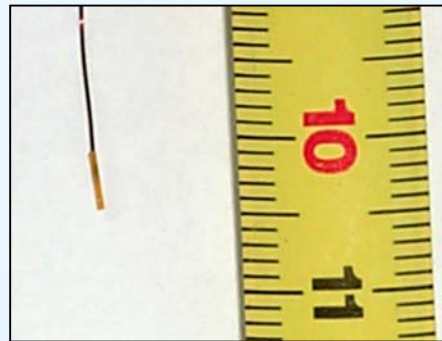
Mesure de température en un ou plusieurs points du corps de l'outil

Placement des capteurs:

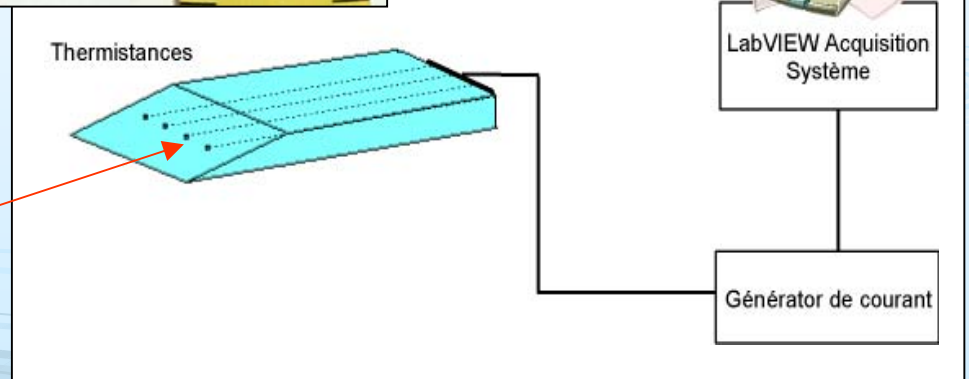
- Proche de la zone sollicitée pendant l'usinage (inversion)
 - Influence du bruit de mesure

☐ Thermistances

- ✓ Bonne sensibilité ($\text{mV}/^\circ\text{C}$)
- ✓ Rapport signal/bruit important
- ✓ Dimensions plus grandes (0.4×4)mm



Plusieurs capteurs
- plus d'informations

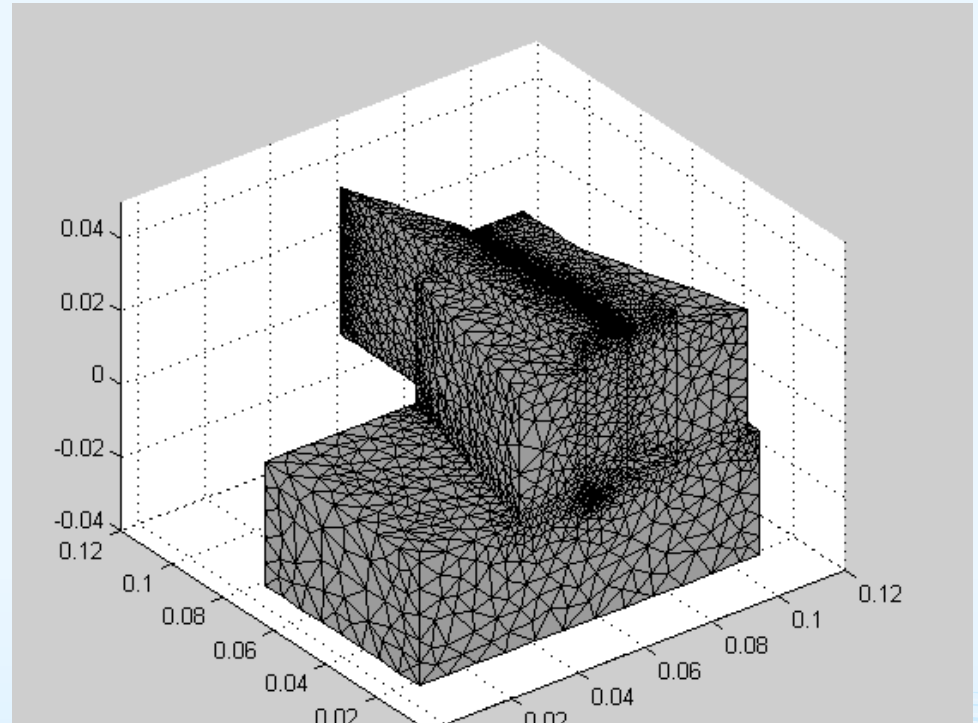


Contraintes pour l'élaboration du modèle de comportement

Les propriétés thermiques :

(conductivité thermique, capacité thermique, coefficients d'échange, résistance thermique de contact) des différents éléments constituant l'outil sont inconnus.

-L'estimation de tous les paramètres nécessite plusieurs expériences.

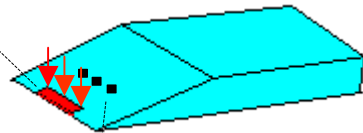
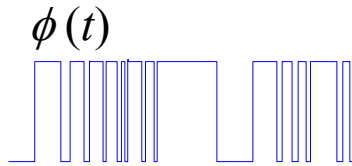


Les dimensions du capteur sont du même ordre de grandeur que la distance vis-à-vis de l'arête de coupe:

- La mesure n'est pas ponctuelle
- Le transfert de chaleur dans l'outil est modifié par la présence des capteurs

Obtention du modèle direct au sens de l'identification de systèmes

Simulation des conditions d'usinage

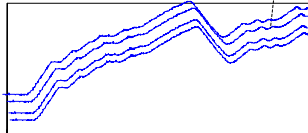


Identification

Estimation des paramètres α_i du modèle de comportement de l'outil :

$$T_c(J, t) = F_{\alpha_i}[\phi(t)]$$

Températures aux capteurs



Structure du modèle direct : approche par identification de systèmes non entiers

Calculs des solutions de l'équation de la chaleur pour diverses configurations 1D ont conduit à l'expression:

$$\sum_{i=0}^M \alpha_i I^{i/2} T_c(t) = \sum_{i=0}^L \beta_i I^{i/2} \phi(t) \quad \alpha_0 = 1$$

Le nombre de paramètres dépend essentiellement de la distance entre capteur et zone d'application de la sollicitation

Où:
$${}_c I_t^\nu f(t) = \frac{1}{\Gamma(\nu)} \int_c^t (t-u)^{\nu-1} f(u) du, \quad \text{Re}(\nu) > 0$$
 L'intégrale fractionnaire

Cette structure de modèle est cohérente avec le processus de diffusion de la chaleur - Paramètres exprimés explicitement en fonction des propriétés thermophysiques du système : $(a_i, b_i) = f(\alpha, \lambda, \rho, C_p)$

Méthode d'inversion

Estimation des sollicitations imposées sur l'arête de coupe de l'outil en utilisant la mesure de température aux capteurs $Y(t)$

- Utilisation d'une technique séquentielle avec spécification de fonction
 - Température calculée au capteur m : produit de convolution du flux et de la réponse impulsionnelle de l'outil

$$T(K\Delta t, m) = \sum_{l=0}^K h((K-l+1)\Delta t, m)\phi(K\Delta t) + T_{0,m}, \quad 1 \leq K \leq N, \quad 1 \leq m \leq J$$

Si on connaît la réponse impulsionnelle

- On considère que le flux est constant sur un nombre d'instant r

$$\hat{\phi}(K\Delta t) = \frac{\sum_{j=1}^r \sum_{m=1}^J \left(Y(((K+j-1)\Delta t), m) - \tilde{T}(((K+j-1)\Delta t), m) \right) dh_{j,m}}{\sum_{j=1}^r \sum_{m=1}^J dh_{j,m}^2}$$

- avec

$$dh_{j,m} = \sum_{i=1}^j h((i\Delta t), m) \quad \tilde{T}(((K+j-1)\Delta t), m) = \sum_{l=1}^{K-1} h(((K+j-l)\Delta t), m)\hat{\phi}(l\Delta t) + T_{j,m}(0), \quad 1 \leq j \leq r$$

Reconstruction de la réponse impulsionnelle et de son domaine de confiance

On simule la réponse impulsionnelle par l'introduction d'un Dirac de flux :

$$\sum_{i=0}^M \alpha_i I^{i/2} T_0(t) = \sum_{i=0}^L \beta_i \frac{t^{i/2-1}}{\Gamma(i/2)}$$

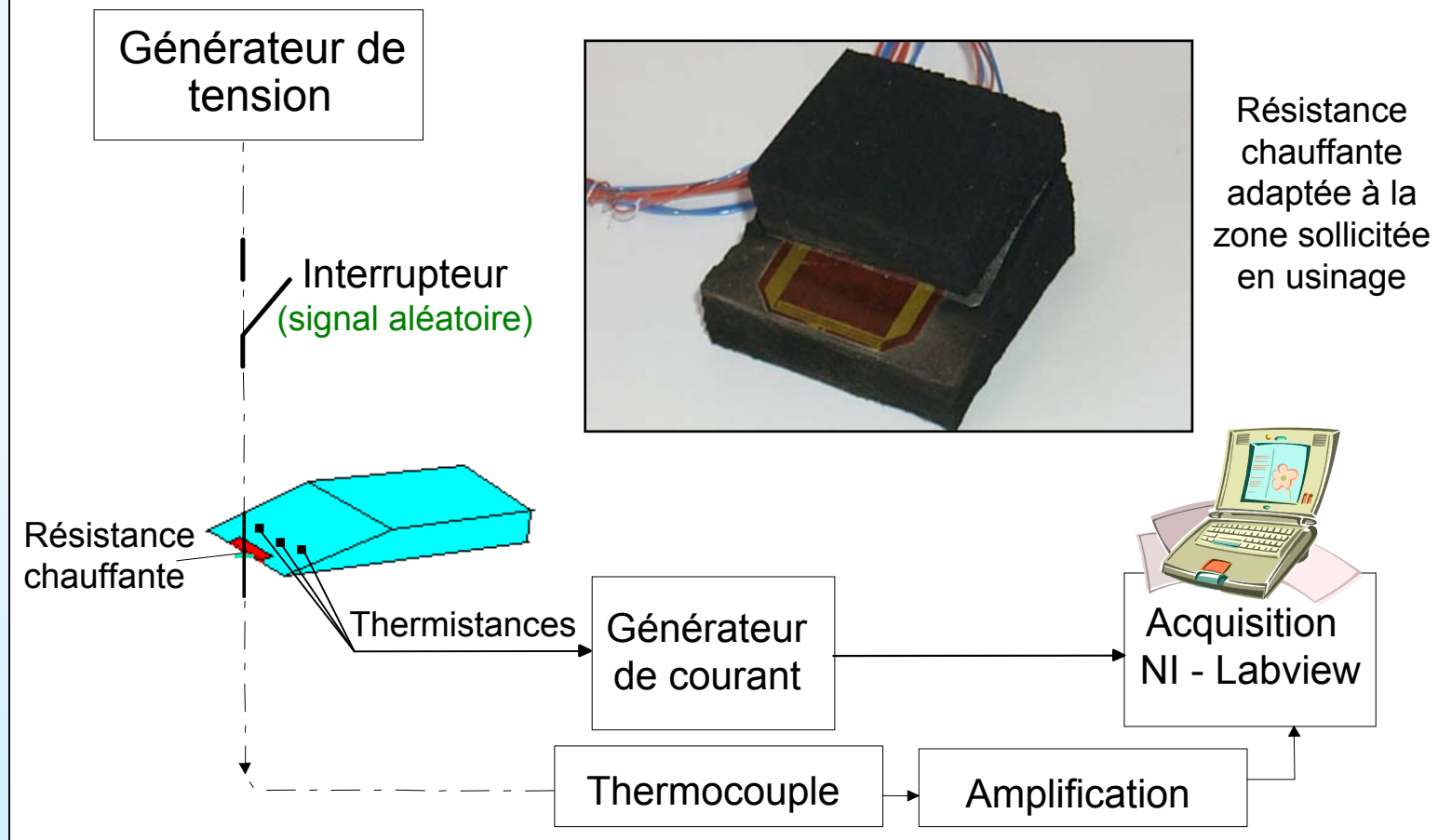
La connaissance du domaine de confiance des paramètres du modèle non entier permet d'exprimer le domaine de confiance de la réponse impulsionnelle:

$$\Delta h = \sum_{i=0}^L \Delta \beta_i I^{i/2} \frac{t^{i/2-1}}{\Gamma(i/2)} - \sum_{i=0}^M \Delta \alpha_i I^{i/2} h(t) - \sum_{i=0}^M (\alpha_i + \Delta \alpha_i) I^{i/2} \Delta h(t), \quad \alpha_0 = 1, \quad \Delta \alpha_0 = 0$$

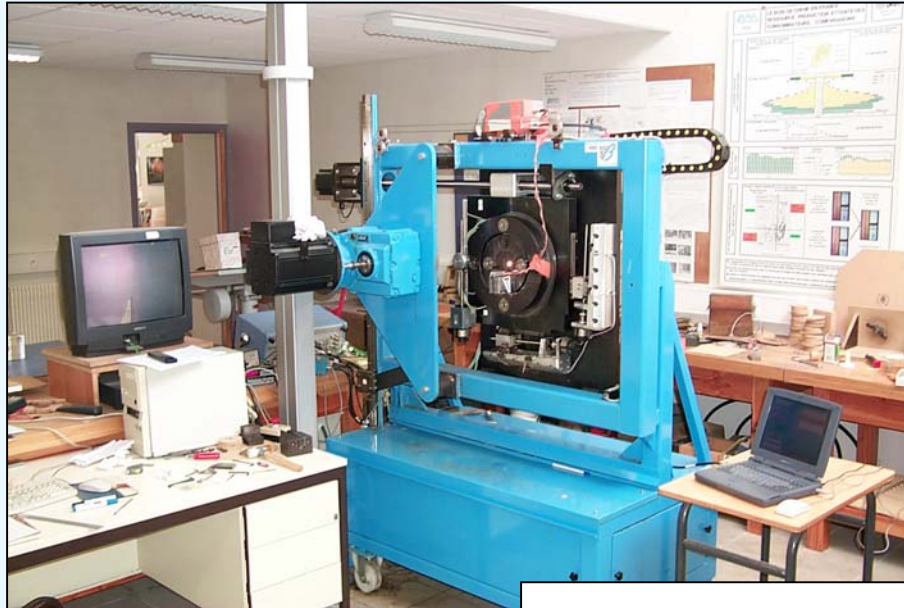
(résolution numérique avec approximation de Grünwald)

Dispositif expérimental de caractérisation de l'outil

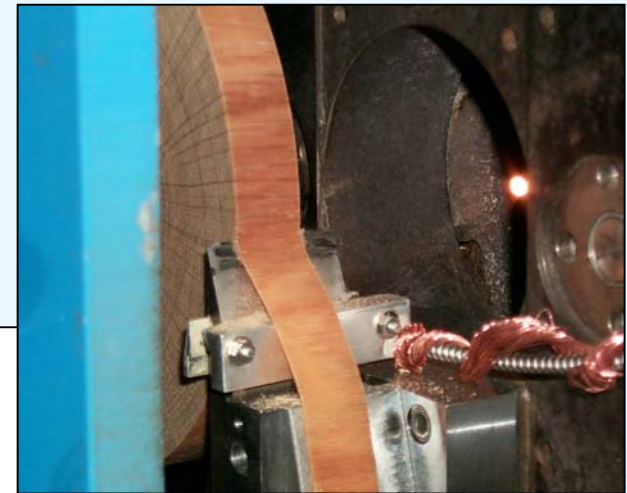
Reproduction des conditions thermiques de coupe sur l'outil



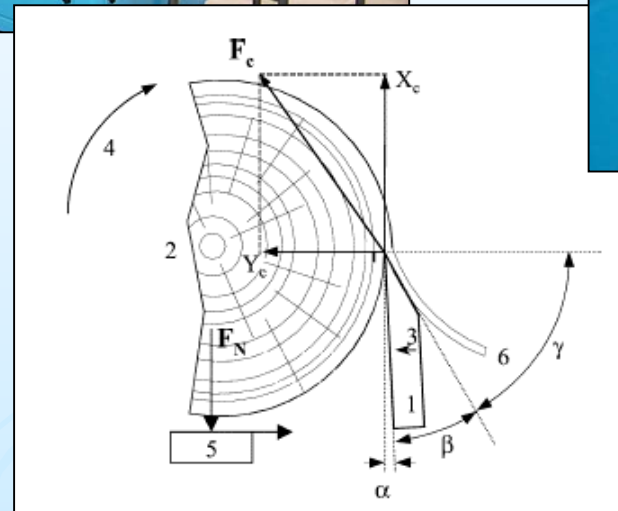
Applications – déroulage



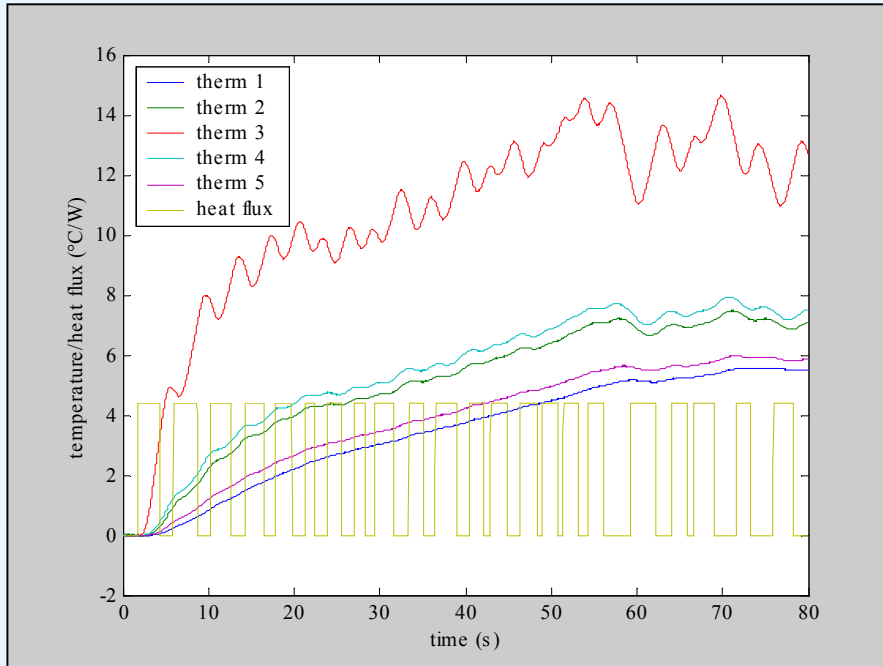
collaboration avec R. Marchal,
LABOMAP, ENSAM de Cluny



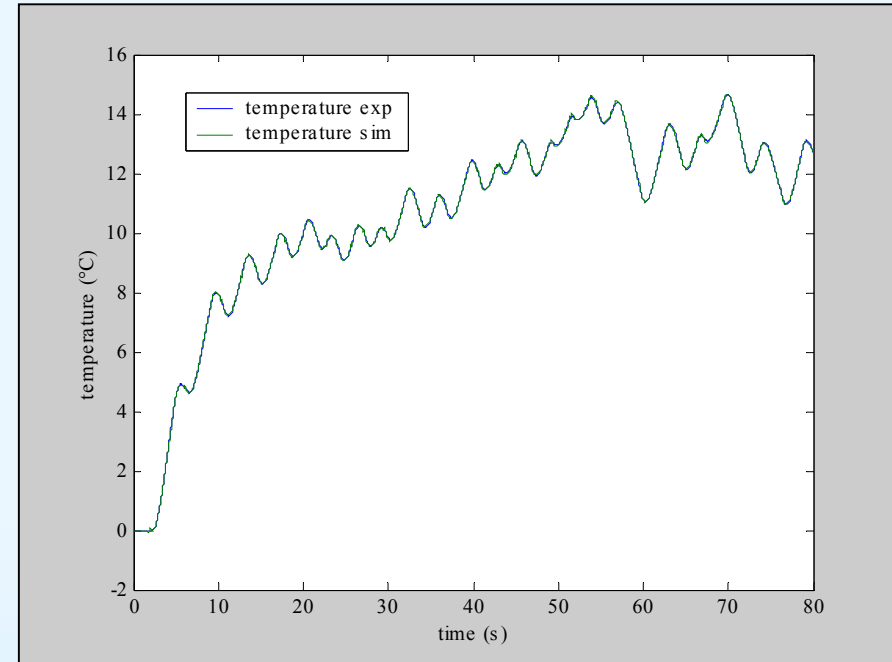
μdérouleuse du LABOMAP



Caractérisation de l'outil de déroulage

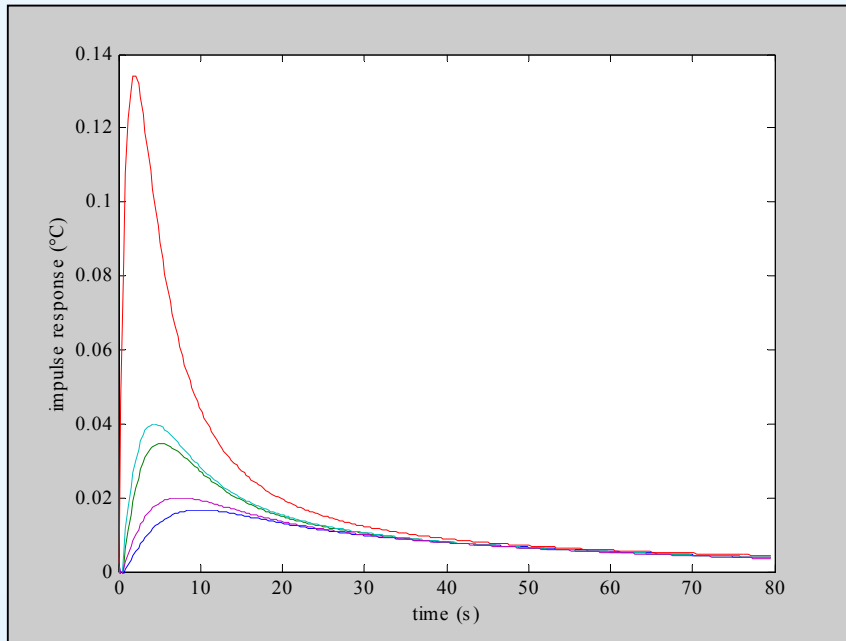


Données expérimentales
Echantillonnage 0.02 sec

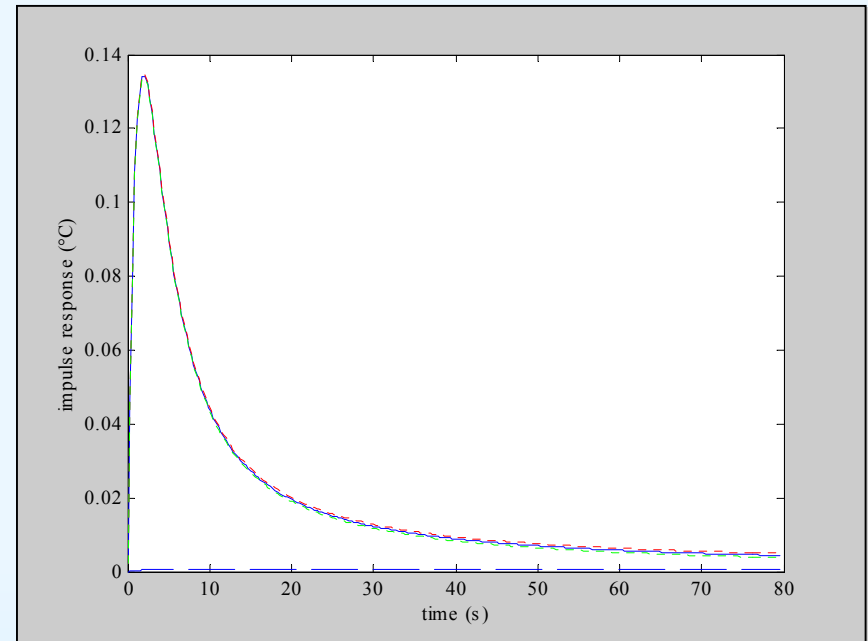


Exemple de comparaison entre la
température mesurée et calculée à partir
du modèle identifié

Caractérisation de l'outil de déroulage



Réponses impulsionnelles pour chaque capteur dans l'outil



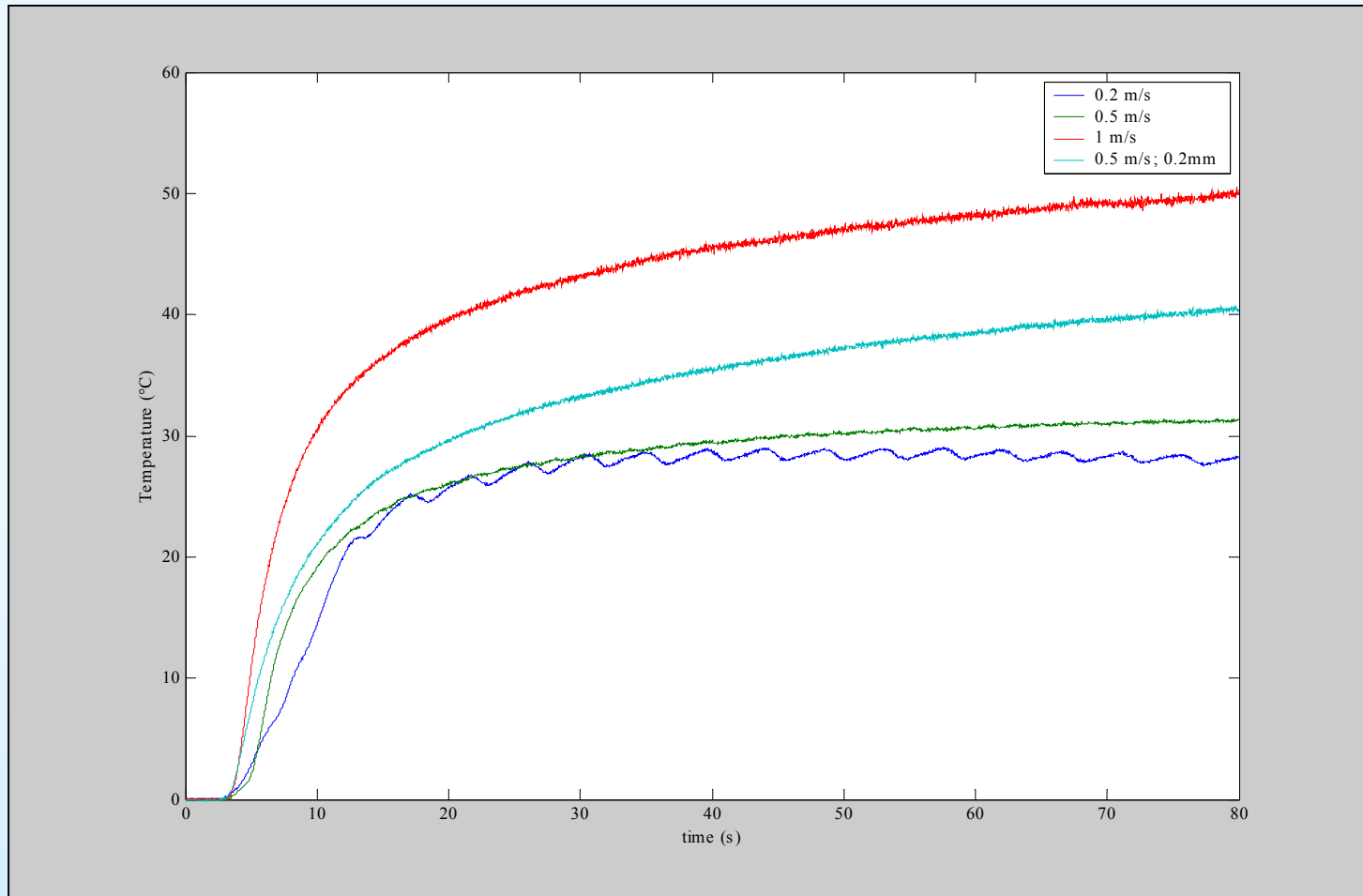
Réponse impulsionnelle avec les écarts

Echantillonnage 0.3 sec

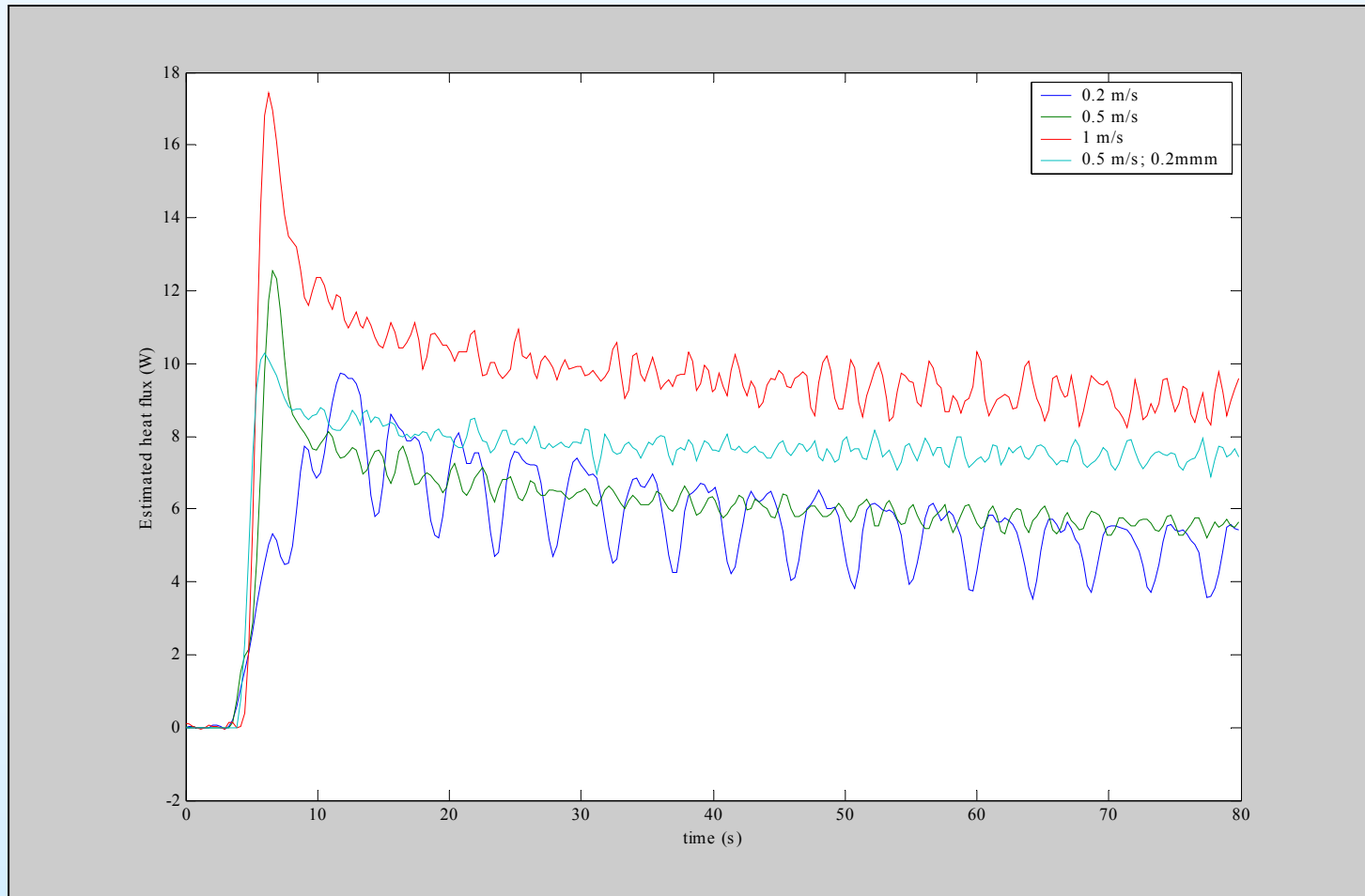
Un des modèles obtenus :

$$\left[1 + \begin{matrix} 0.501I^{1/2} & 0.811I & 0.322I^{3/2} & 0.047I^2 \\ (\pm 0.015)^+ & (\pm 0.067)^+ & (\pm 0.013)^- & (\pm 0.001)^* \cdot 1e-5 \end{matrix} \right] T_i(t) = \left[\begin{matrix} -0.146 & 1.016I^{1/2} & 2.434I & 2.062I^{3/2} \\ ((\pm 0.052)^+ & (\pm 0.009)^- & (\pm 0.055)^+ & (\pm 0.013)^* \cdot 1e-4 \end{matrix} \right] \phi_0(t)$$

Résultats pour le MDF - température mesurée



Résultats pour le MDF – flux de chaleur estimé



Conclusions

- Modélisation au sens de l'identification de systèmes non entiers :
 - Avantages :
 - même capteur pour l'identification et l'estimation
 - influence du capteur sur le transfert de chaleur est prise en compte dans le modèle de comportement de l'outil
 - peu de paramètres
 - cohérence avec le processus physique
 - modèle continu en temps permet le traitement d'un signal de flux aléatoire plus intéressant (par de nombreux aspects) vis-à-vis de la caractérisation que le Dirac.
 - Inconvénient :
 - banc expérimental de caractérisation