

Journée SFT - Groupes METTI et Modes de transfert - 13 juin 2013  
Caractérisation thermique température-température

Estimation de propriétés thermophysiques à partir  
de la mesure de deux températures :  
de la caractérisation de matériaux composites en  
laboratoire au contrôle in situ de l'isolation de  
bâtiments

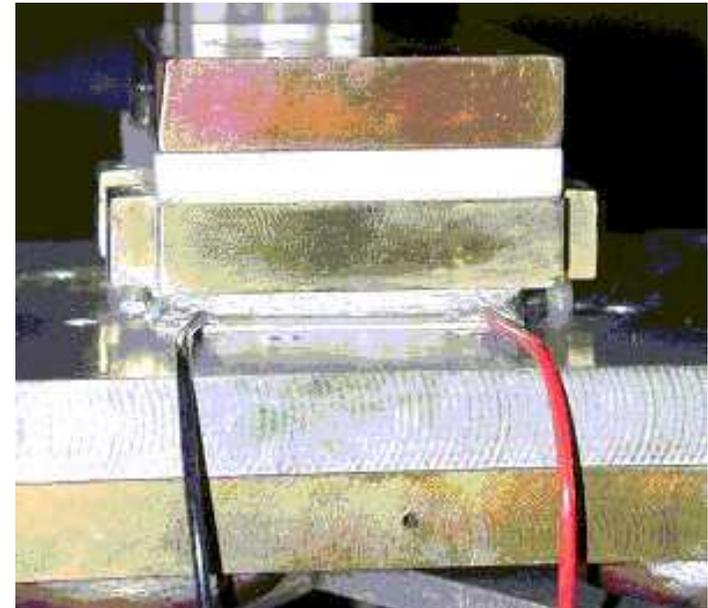
*Vincent FEUILLET, Mustapha KARKRI, Laurent IBOS,  
Jean-Pierre MONCHAU, Mohamed LARBI YUCEF, Yves CANDAU  
CERTES, Université Paris-Est*

## Caractérisation de matériaux composites

➤ **Contexte et objectifs :**

- Banc expérimental DICO
- Caractérisation thermique de matériaux composites ou isolants
- Excitation thermique périodique
- Enceinte à vide ( $10^{-5}$  à  $10^{-4}$  mbar)
- Régulation de température par circulation de fluide ( $-20^{\circ}$  C à  $180^{\circ}$  C)

⇒ **Mesure simultanée de la conductivité et de la diffusivité thermiques**



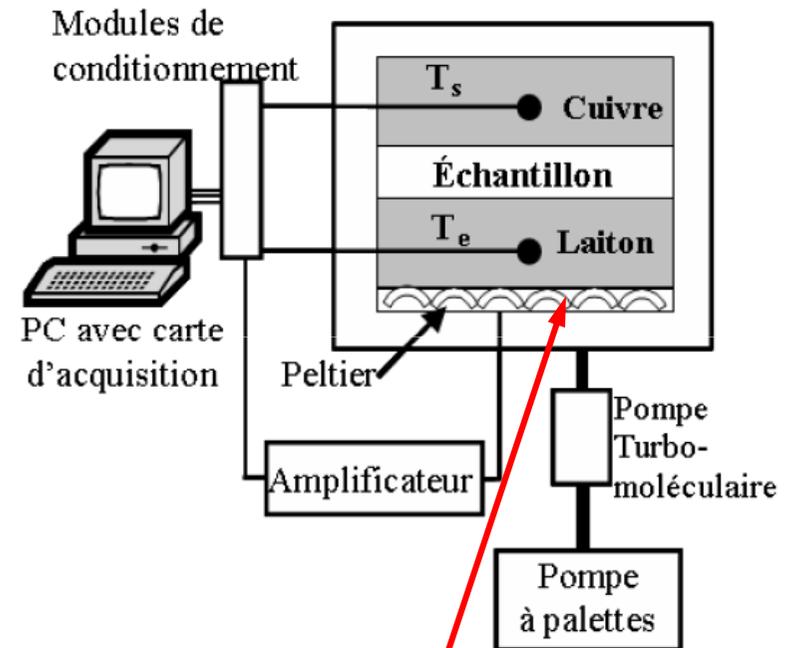
*Vue du porte-échantillon du banc expérimental DICO*

Caractérisation de matériaux composites

➤ **Principe de mesure :**

- Echantillon positionné entre deux plaques métalliques
- Excitation périodique imposée par un élément Peltier placé sous le porte échantillon
- Signal d'excitation : somme de  $N$  sinusoïdes ( $1 \leq N \leq 5$ )
- Amplitude  $V_i$  et phases  $\varphi_i$  déterminées empiriquement
- Mesures de température par thermocouples de part et d'autre de l'échantillon
- Application *LabView*® : signal de commande du Peltier, mesures thermocouples

*Synoptique du banc expérimental DICO*



$$V(t) = \sum_{i=1}^5 V_i \cdot \sin(2\pi f_0 2^{i-1} t + \varphi_i)$$

Caractérisation de matériaux composites

➤ **Modélisation thermique :**

- Hypothèses :
  - ⇒ *Transfert unidirectionnel*
  - ⇒ *Régime périodique établi*
  - ⇒ *Echange avec la face arrière*
  - ⇒ *Résistance de contact*

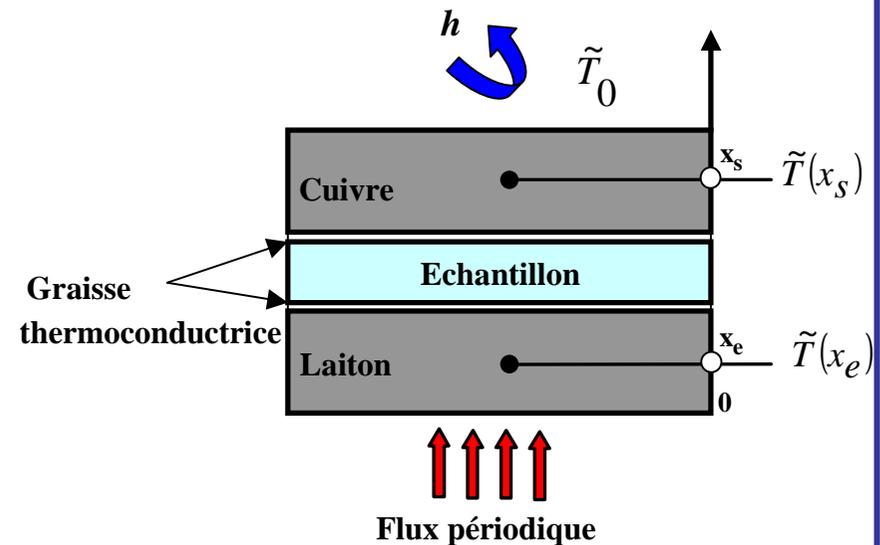
- Méthode des quadripôles thermiques :

$$[Q] = \prod_{i=1}^N [Q]_i$$

- Fonction de transfert théorique :

$$\tilde{H} = \frac{\tilde{T}(x_s)}{\tilde{T}(x_e)} = f(k, a)$$

*Schématisation des transferts*



Caractérisation de matériaux composites

➤ **Identification de paramètres :**

- Estimation de la conductivité et de la diffusivité thermiques :

⇒ *Minimisation de l'écart quadratique entre les parties réelles et imaginaires des fonctions de transfert expérimentale et théorique*

$$S(\hat{\beta}_{k,a}) = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \tilde{H}_{real}(f_i) - H_{real}(f_i) \right)^2 + \left( \tilde{H}_{imag}(f_i) - H_{imag}(f_i) \right)^2 \right]$$

⇒ *Incertitudes statistiques déduites de la matrice de variance-covariance*

$$\text{cov}(\hat{\beta}_{k,a}) = \sigma^2 (m \cdot m^T)^{-1} \begin{cases} m = \left( \frac{\partial \hat{H}}{\partial \hat{\beta}_{k,a}} \right) \\ \sigma^2 = \frac{S(\hat{\beta}_{k,a})}{N - q} \end{cases} \begin{matrix} \longrightarrow \text{cov}(\hat{\beta}_{k,a}) = \begin{bmatrix} \sigma_{\hat{k}}^2 & \sigma_{\hat{k}\hat{a}} \\ \sigma_{\hat{a}\hat{k}} & \sigma_{\hat{a}}^2 \end{bmatrix} \\ \longrightarrow \beta_{k,a} = \hat{\beta}_{k,a} \pm 2\sigma_{\hat{\beta}_{k,a}} \end{matrix}$$

- Limitations :

⇒ *Non-prise en compte de l'incertitude sur les paramètres supposés connus du modèle*

⇒ *Méthode bien adaptée pour des polymères et composites d'épaisseur entre 1 et 10 mm*

⇒ *Non-adaptée pour matériaux fins (films) et/ou conducteurs (métaux): résistances de contact trop influentes*

Caractérisation de matériaux composites

➤ Exemple de mesure :

- Echantillon de PTFE de 5 mm d'épaisseur

- Valeurs identifiées :

$$\hat{k} = 0,234 \pm 0,007 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\hat{a} = (1,070 \pm 0,047) \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$$

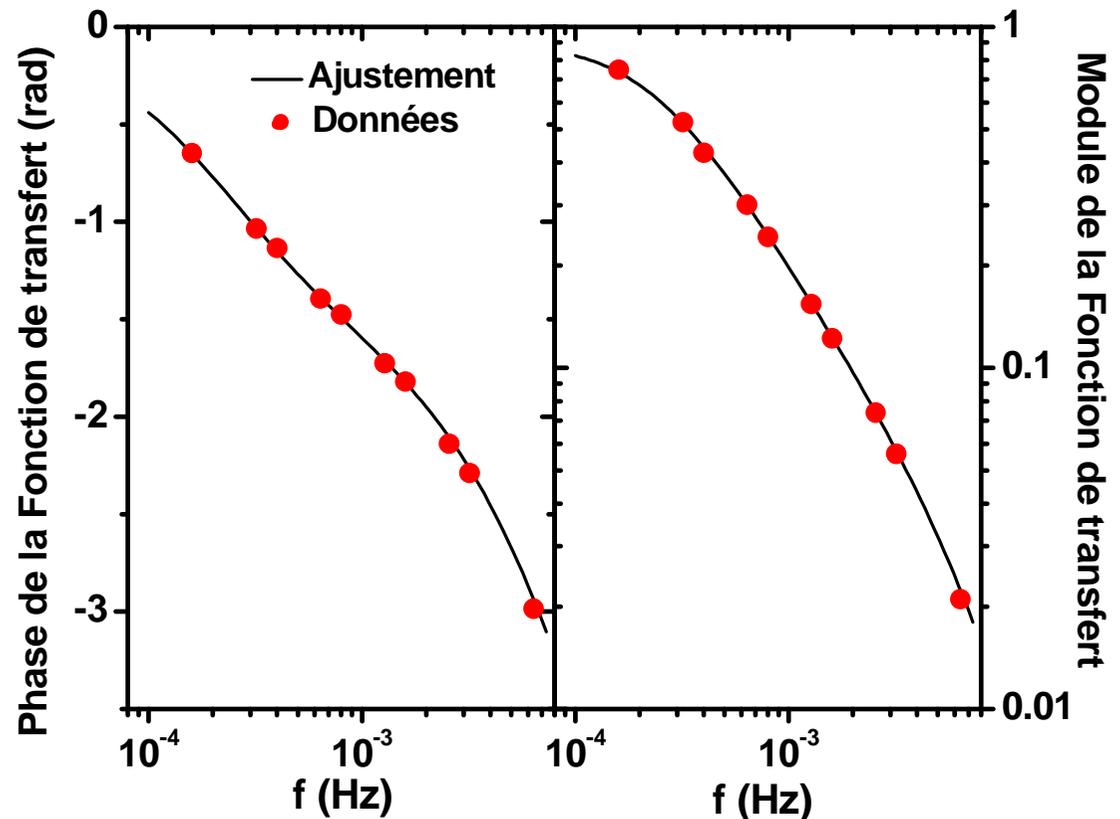
$$U(k)/k = 3\%$$

$$U(a)/a = 4,5\%$$

- Valeurs de la littérature :

$$k = 0,25 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$a = 1,13 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$$

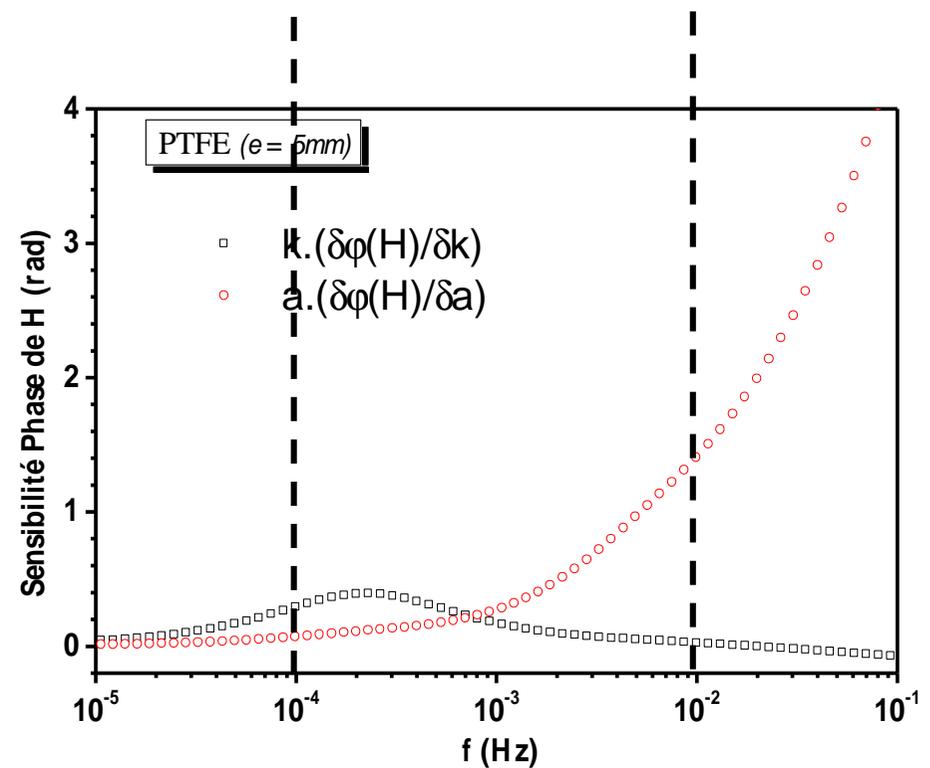
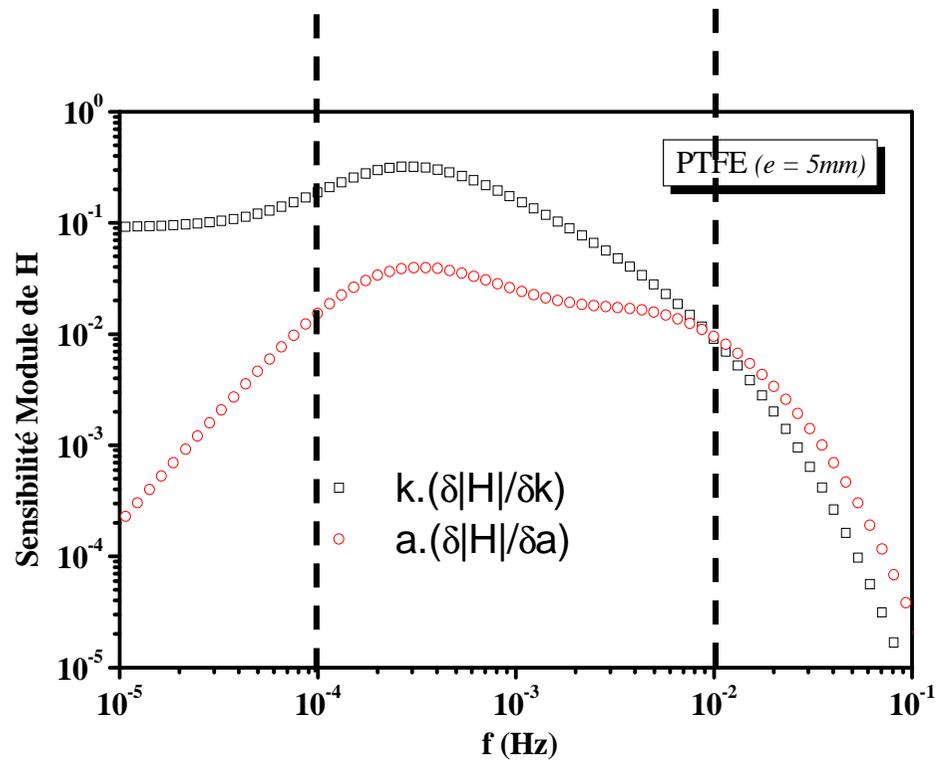


Thèse A. BOUDENNE (2003)

Caractérisation de matériaux composites

➤ Etude de sensibilité :

- Echantillon de PTFE de 5 mm d'épaisseur

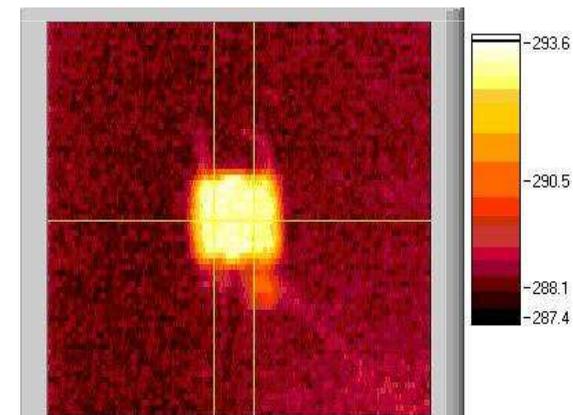


## Caractérisation de matériaux composites

➤ **DICO étendue :**

- Excitation thermique périodique
- Seconde plaque métallique supprimée
- Echantillon à l'air ambiant
- Caméra thermique en face arrière

⇒ ***mesure simultanée de l'émissivité, de la conductivité et de la diffusivité thermiques***

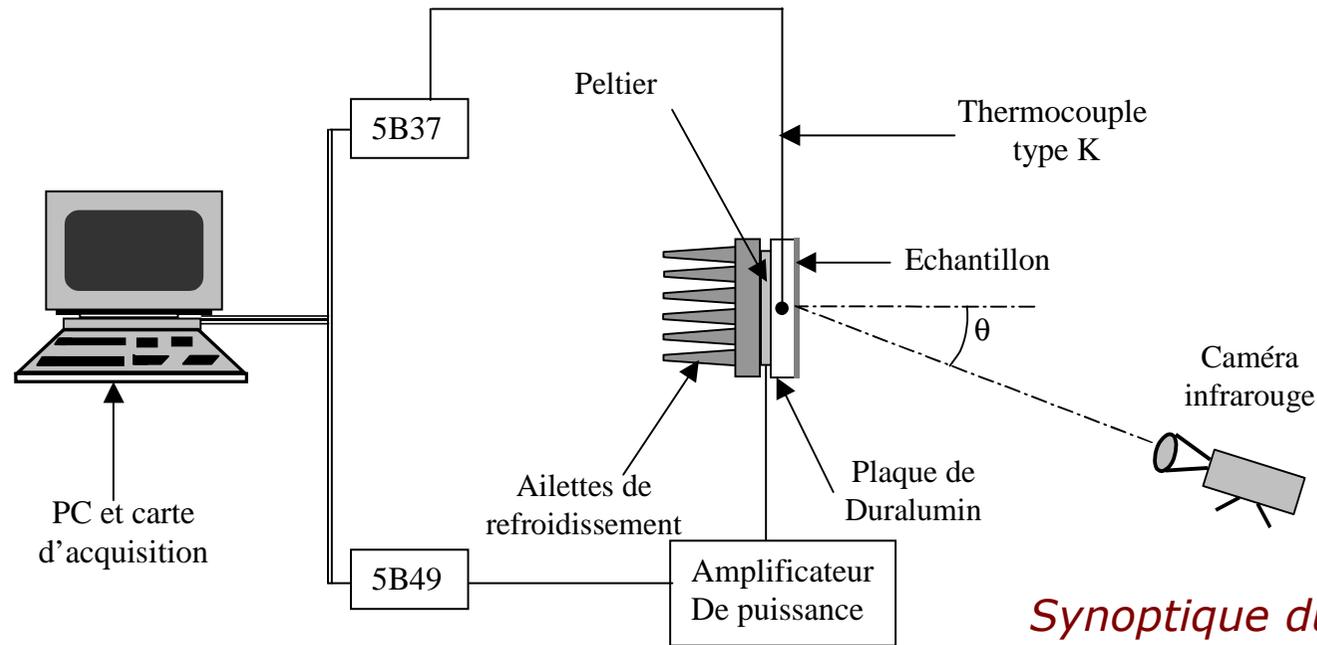


*Vue du porte-échantillon avec un échantillon de PTFE en partie recouvert de peinture noire*

Caractérisation de matériaux composites

➤ **Principe de mesure :**

- Echantillon fixé sur une plaque de duralumin avec thermocouple (face avant)
- Excitation périodique imposée par un élément Peltier placé sous la plaque de duralumin
- Mesure par caméra thermique du flux émis par la face arrière de l'échantillon
- Application *LabView*® : signal de commande du Peltier, mesures thermocouple et caméra



*Synoptique du banc expérimental DICO étendu*

Caractérisation de matériaux composites

➤ **Calcul de l'émissivité et de la fonction de transfert thermique expérimentale :**

- Comparaison à une surface de référence d'émissivité connue (peinture noire)
- Mesure du flux émis et du flux incident réfléchi par la surface

⇒ *Méthode modulée*

⇒ *Séparation des deux flux*



*Face arrière de l'échantillon*

- Emissivité directionnelle :

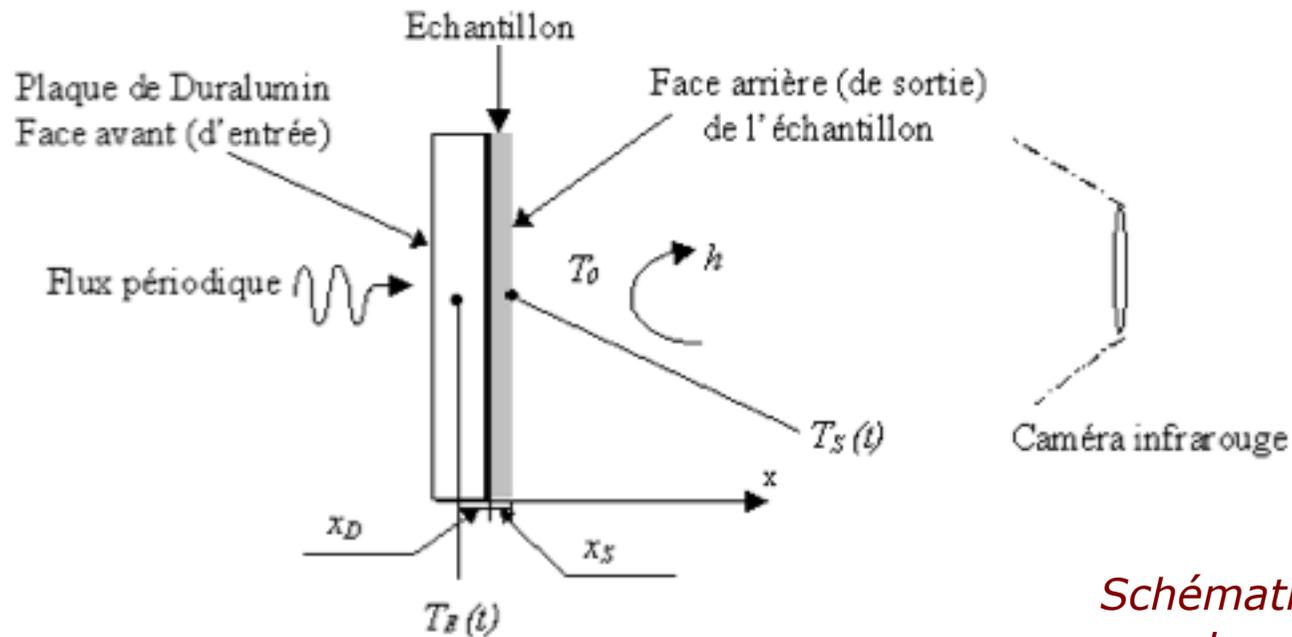
$$\epsilon_s = \epsilon_{ref} \cdot \frac{\bar{T}_{s,camera}^3 \Delta T_{s,camera}}{\bar{T}_{ref,camera}^3 \Delta T_{ref,camera}}$$

- La fonction de transfert expérimentale :

$$\tilde{H}(f) = \frac{\tilde{T}_S(f) \tilde{T}_E^*(f)}{\tilde{T}_E^2(f)}$$

## Caractérisation de matériaux composites

- **Modélisation thermique** : quadripôles thermiques
- **Identification** : minimisation de l'écart entre les parties réelles et imaginaires des fonctions de transfert théorique et expérimentale
- **Incertitudes** : matrice variance-covariance (intervalle de confiance de 95%, facteur d'élargissement égal à 2)

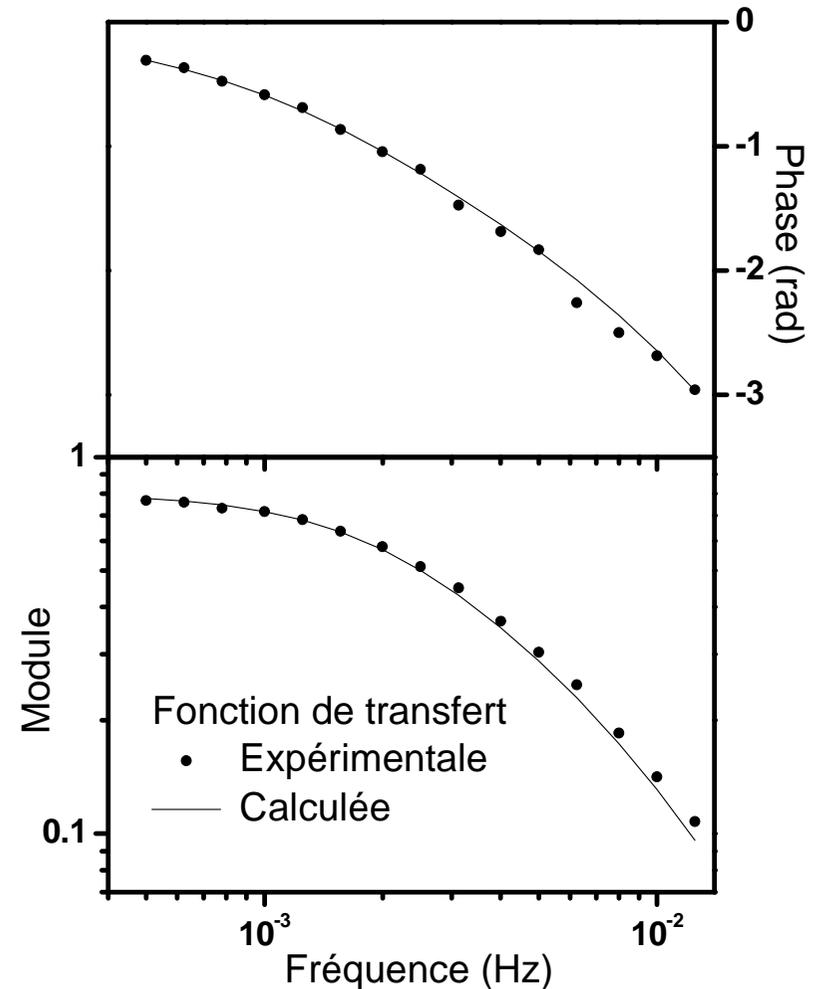


*Schématisation des transferts*

Caractérisation de matériaux composites

➤ **Exemple de mesure :**

- Echantillon de PVC de 5 mm d'épaisseur
- Valeur de l'émissivité obtenue (à  $f < 10^{-3}$  Hz) :  $0.98 \pm 0.03$   
*Rq* - émissivité du PVC mesurée uniquement à basse fréquence pour minimiser l'influence de la couche de peinture noire.
- Conductivité identifiée :  
 $k = 0.167 \pm 0.017 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$   
 Diffusivité identifiée:  
 $a = (1.199 \pm 0.038) \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$   
 (valeurs en accord avec la littérature)

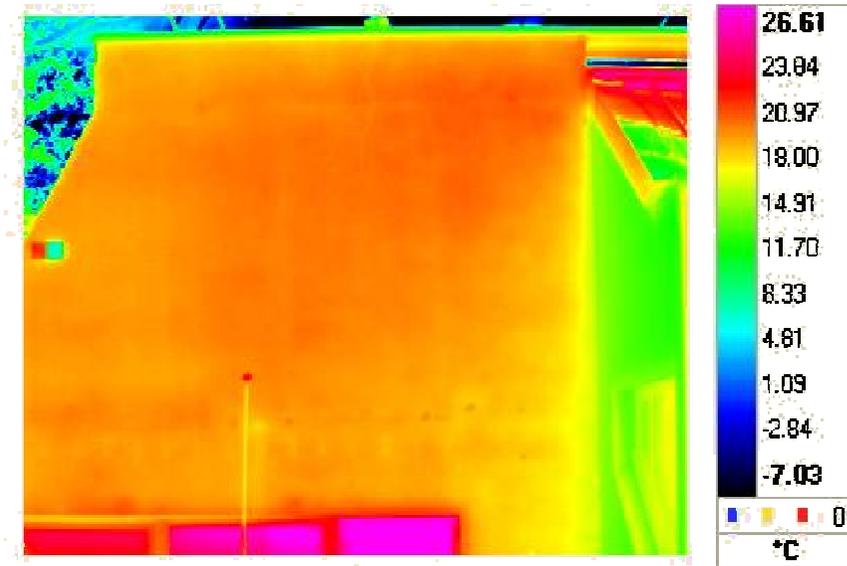


## Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ **Contexte et objectifs :**

- Projet DPE\_IITI (*Diagnostic de Performance Énergétique et Inspection de l'Isolation par Thermographie Infrarouge*)
- Acteurs du projet :  
*ADEME (financement), FLIR, TCEP Ingénierie, mairie de Noisiel, Alpheeis*
- Contrôle de l'isolation d'une paroi d'un bâtiment d'un groupe scolaire
- Thermographie infrarouge passive
- Mesures additionnelles (éclairage solaire, températures d'air...)

⇒ ***Diagnostic thermique d'une paroi sur site***



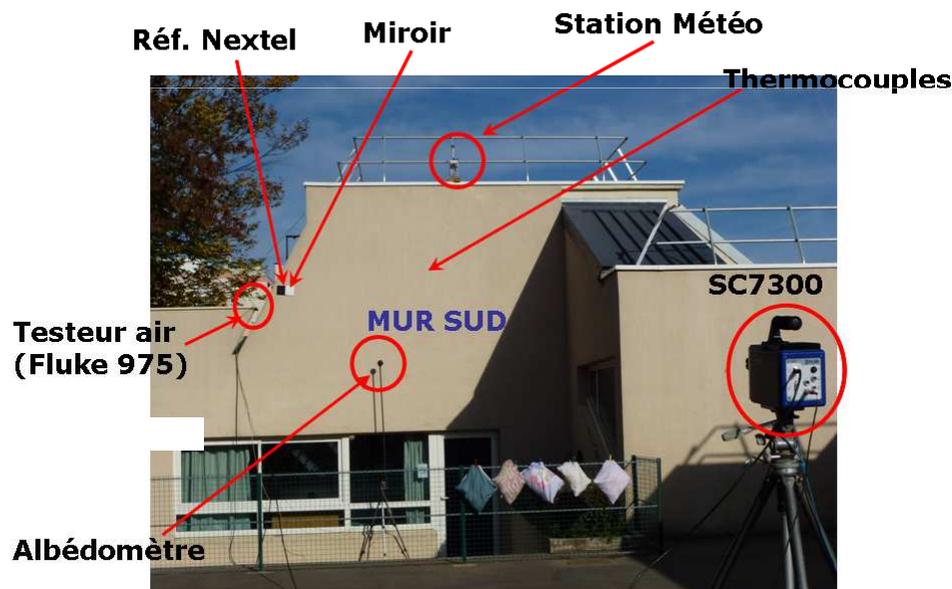
Contrôle de l'isolation de bâtiments

*Choix de la façade :*

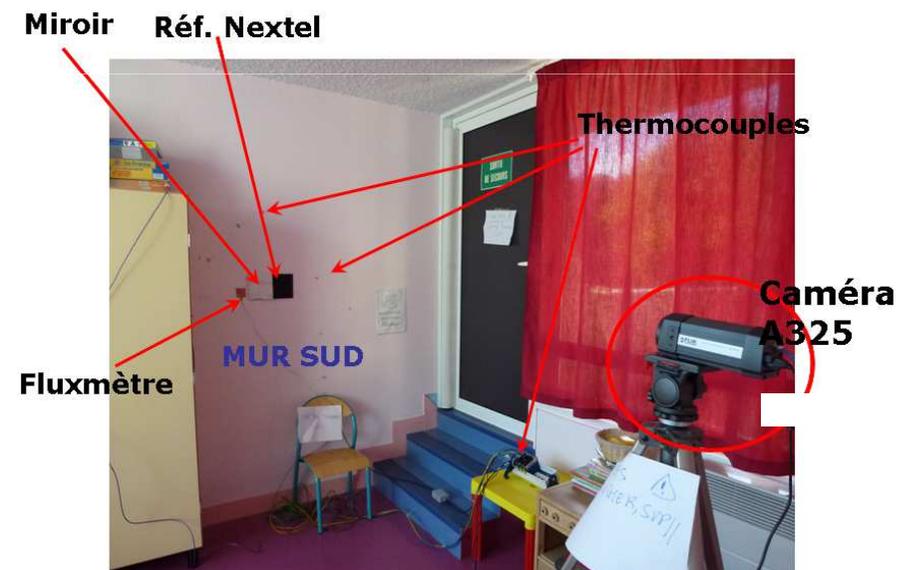
Mezzanine de deux classes: paroi orientée plein sud sans fenêtre, ni porte

Grande surface de mur à l'intérieur et à l'extérieur

Matériel d'acquisition à l'intérieur, recul dans la cour, accès à la toiture



**Position des capteurs à l'extérieur du bâtiment**



**Position des capteurs à l'intérieur du bâtiment**

## Contrôle de l'isolation de bâtiments

Grandeurs mesurées :

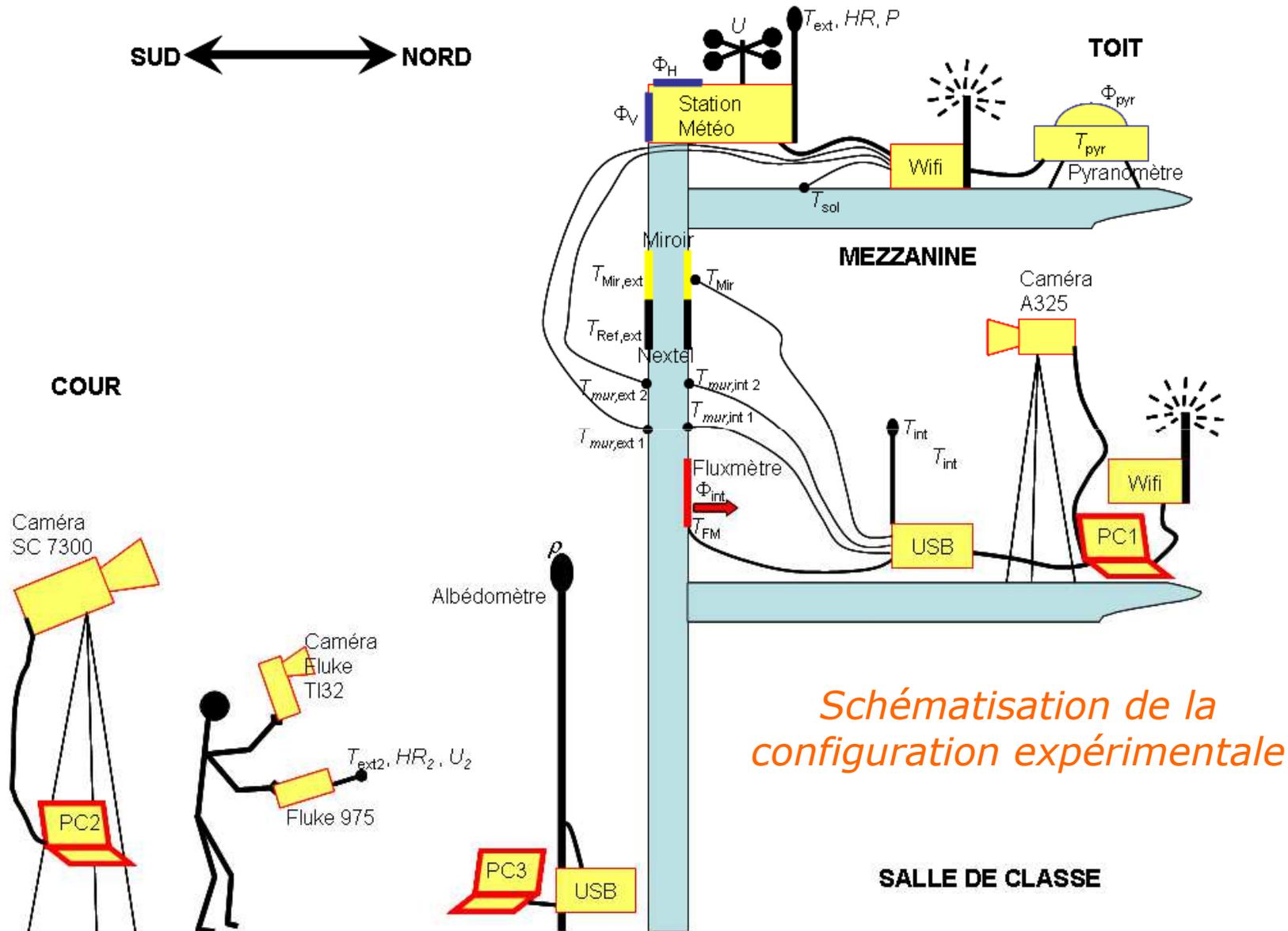
- *paramètres atmosphériques : station météo développée au CERTES*
- *températures de paroi ou d'éléments rapportés : caméras, thermocouples*
- *mesures additionnelles : paramètres atmosphériques locaux, albédo de la surface*

Pilotage du système de mesure par application *LabView*  
*échantillonnage 1 min*

Évolution entre deux campagnes de mesures successives :

- *février 2011 : ensemble des capteurs relié par câbles au système d'acquisition à l'intérieur*
- *octobre 2011 : système d'acquisition Wifi pour les capteurs extérieurs*

Contrôle de l'isolation de bâtiments



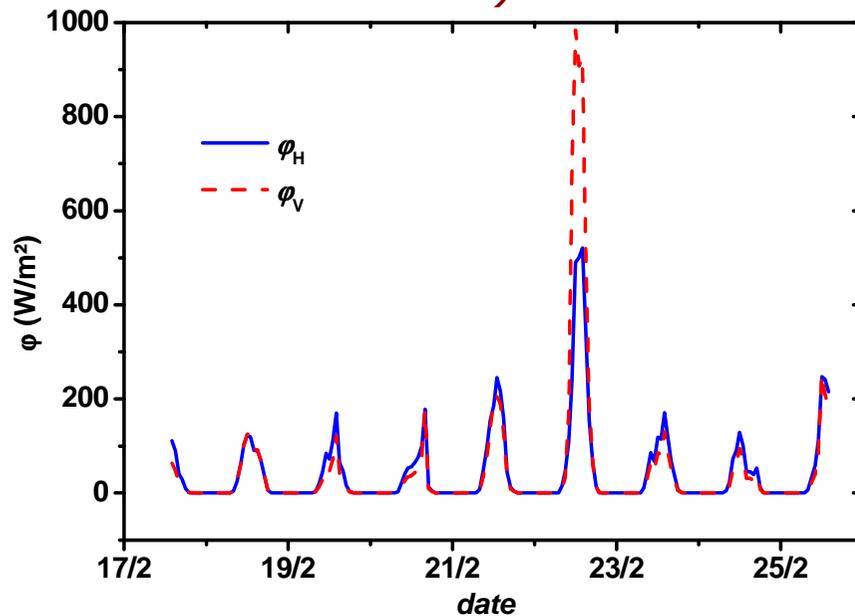
Schématisation de la configuration expérimentale

SALLE DE CLASSE

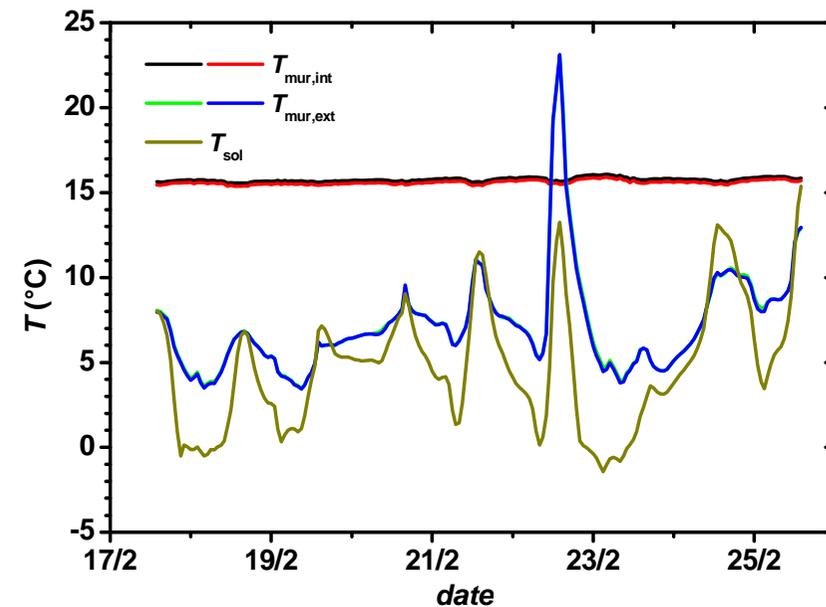
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Caractéristiques des mesures de février 2011 :

- Eclaircement solaire sur la paroi extérieure  
*une journée ensoleillée suit 4 journées couvertes*
- Températures mesurées  
*gradient de 5 à 10° C entre l'intérieur et l'extérieur sauf pour la journée ensoleillée (inversion du gradient), forte stabilité de la température de paroi intérieure (régulation du chauffage au sein de l'école)*



Flux solaires horizontal et vertical



Températures de paroi

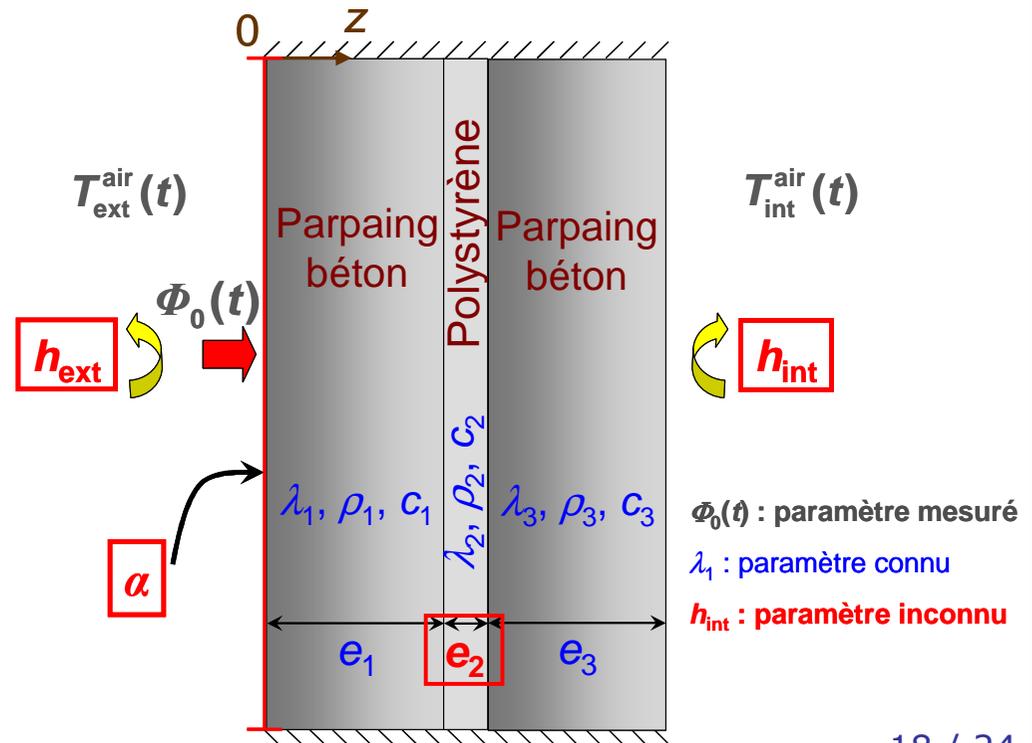
Contrôle de l'isolation de bâtiments

- Évaluation du niveau d'isolation de la paroi examinée :
  - Les mesures sur site sont combinées à une modélisation numérique des transferts de chaleur
  - Méthode des éléments finis (code *Comsol*)
  - Estimation des différents paramètres inconnus de l'étude
  - Minimisation de l'écart entre températures mesurées et estimées

$$S = \sum_{j=1}^J [T_{\text{mesure},j} - T_{\text{estimation},j}(\beta)]^2$$

Couche $i$	$e_i$ (cm)	$\lambda_i$ (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	$\rho_i$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$c_i$ (J.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )
Parpaing béton ( $i=1$ )	16	1.15	1900	1000
Polystyrène ( $i=2$ )	4	0.038	20	1450
Parpaing béton ( $i=3$ )	16	1.15	1900	1000

Caractéristiques de la paroi étudiée sur site



Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Différentes configurations de températures pour l'identification :

- Températures de paroi extérieure  $T_{ext}$  ou intérieure  $T_{int}$  seules
- Gradient intérieur/extérieur  $T_{int} - T_{ext}$
- Période d'échantillonnage de 5 min sur la semaine entière de mesure
- Initialisation  $\beta_{init} = [h_{ext}=10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} ; h_{int}=5 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1} ; \alpha=0.3 ; e_2 = 6 \text{ cm}]$

Températures prises en compte	$h_{ext}$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )	$h_{int}$ ( $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ )	$\alpha$	$e_2$ (cm)	$R_{paroi}$ ( $\text{K.m}^2.\text{W}^{-1}$ )
$T_{ext}$	9.06 (0.05)	11.33 (0.47)	0.53 (0.02)	2.23 (0.05)	0.87
$T_{int}$	7.94 (0.03)	6.33 (0.02)	0.32 (0.01)	5.47 (0.03)	1.72
$T_{int} - T_{ext}$	9.25 (0.05)	4.72 (0.09)	0.27 (0.01)	4.40 (0.08)	1.44

$R_{paroi}^{théorique} = 1.33 \text{ K.m}^2.\text{W}^{-1}$

Résultats d'estimation pour chaque configuration de températures prise en compte

→ Analyses sur  $T_{ext}$  et  $T_{int}$  :

$h_{int} > h_{ext}$  et/ou  $e_2$  éloignée de l'épaisseur réelle d'isolant

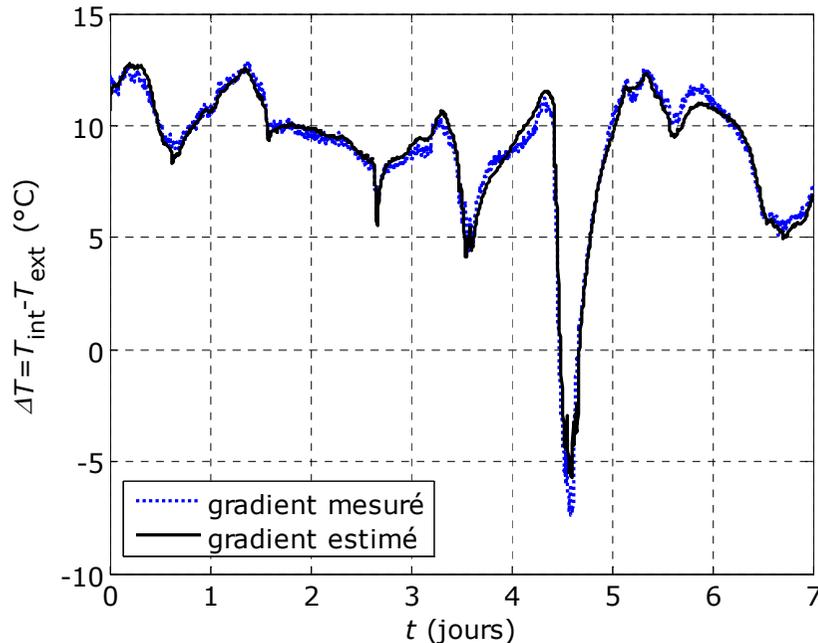
→ Analyse sur le gradient :

$e_2$  proche de l'épaisseur réelle d'isolant

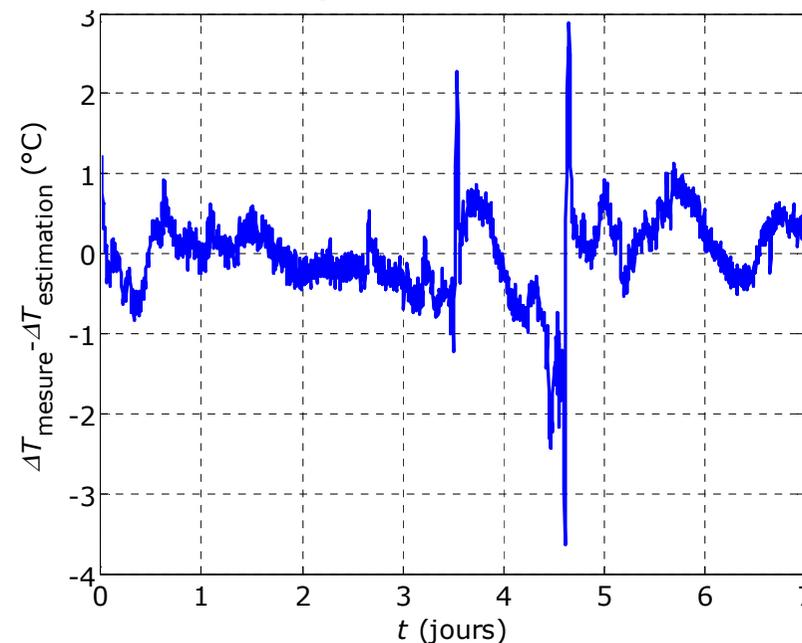
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Différentes configurations de températures pour l'identification :

*Gradients mesuré et estimé*



*Résidu entre les gradients mesuré et estimé*



*Identification à partir du gradient  $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$  sur la semaine de mesures*

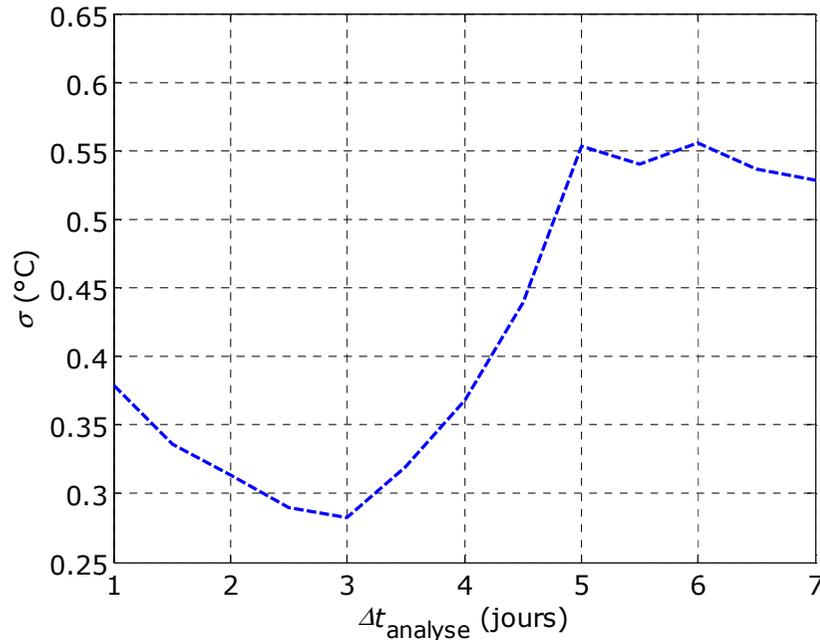
- Bonne concordance entre gradients mesuré et calculé après identification
- Faibles résidus, en grande majorité  $< 1^\circ \text{C}$  en valeur absolue
- Quelques écarts plus importants coïncidant avec des variations brusques et importantes d'ensoleillement :

*probable imprécision de la mesure du flux  
variation du coefficient d'échange non prise en compte*

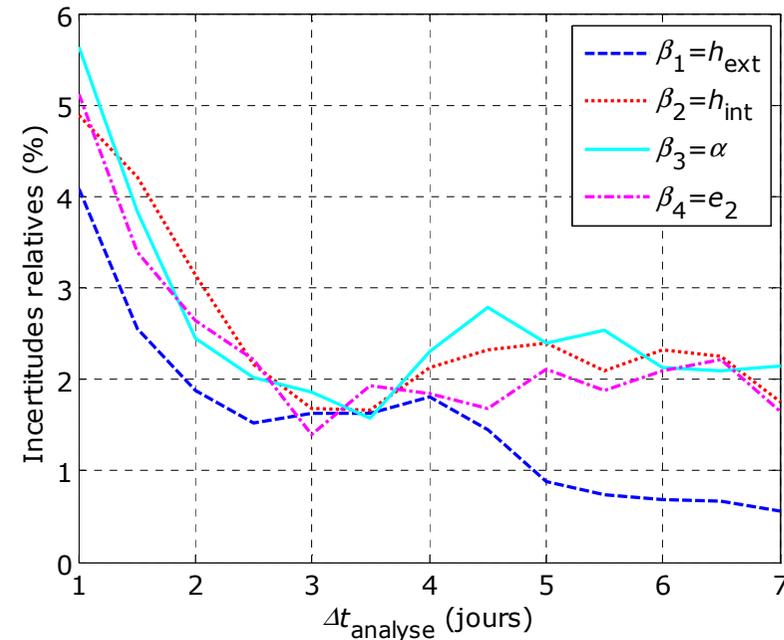
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Influence de la durée d'analyse :

Écart types moyens des résidus



Incertitudes relatives sur les paramètres estimés



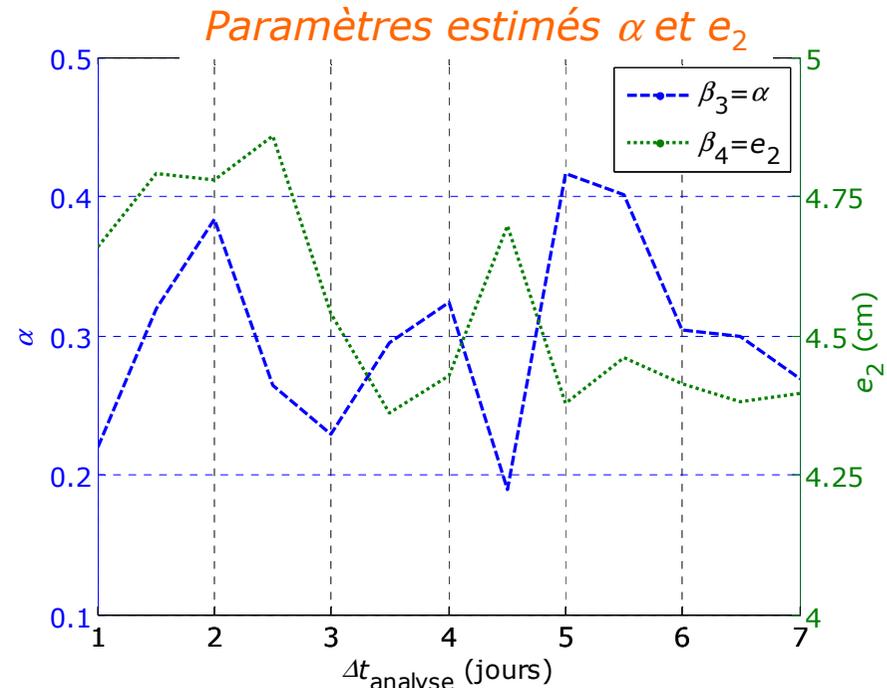
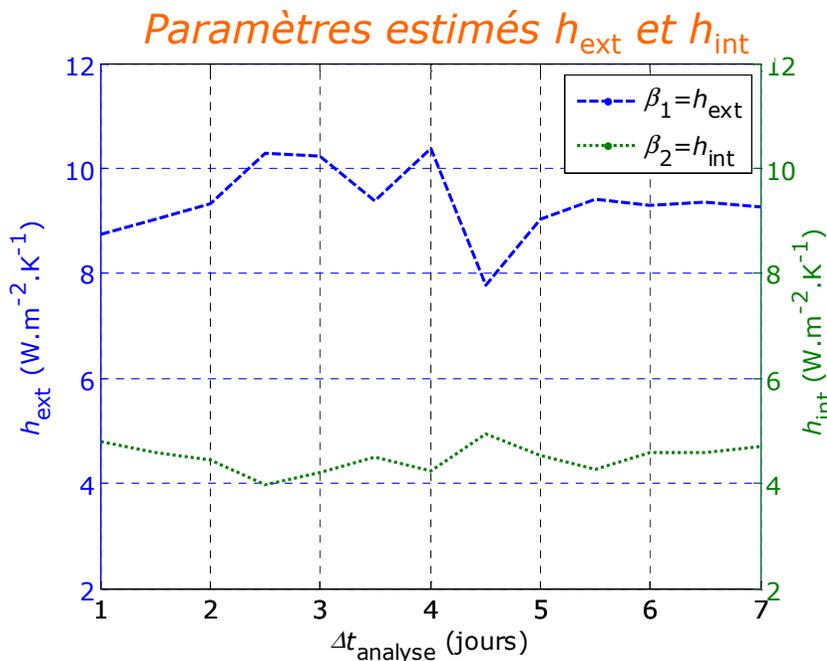
Identification à partir du gradient  $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$  en fonction de la durée d'analyse  
 $\Delta t_{\text{analyse}} = t_{\text{final}} - t_0$

➔ Diminution puis augmentation de l'écart type moyen des résidus à partir du moment où la journée ensoleillée est prise en compte

➔ Diminution des incertitudes sur chaque paramètre pour une durée d'analyse de plus en plus importante, ceux-ci restent faibles même pour une courte durée d'analyse (<6% pour  $\Delta t_{\text{analyse}} = 1$  jour)

Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Influence de la durée d'analyse :



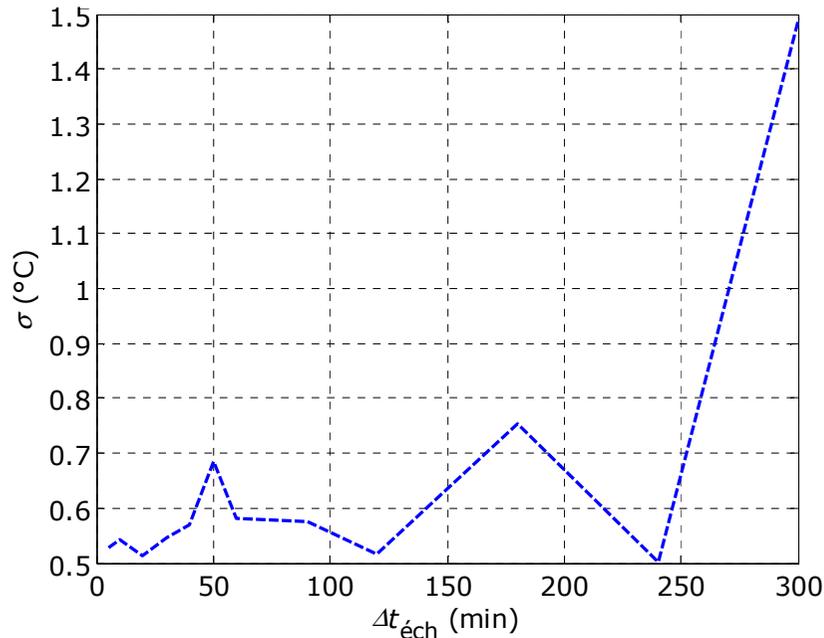
Identification à partir du gradient  $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$  en fonction de la durée d'analyse  $\Delta t_{analyse} = t_{final} - t_0$

- ➔ Les coefficients d'échange estimés sont assez peu dépendants de  $\Delta t_{analyse}$  valeurs relativement éloignées des valeurs conventionnelles de la Réglementation Thermique
- ➔ L'épaisseur de  $e_2$  estimée tend vers 4 cm à mesure que  $\Delta t_{analyse}$  augmente
- ➔ Variation du facteur d'absorption  $\alpha$  significative

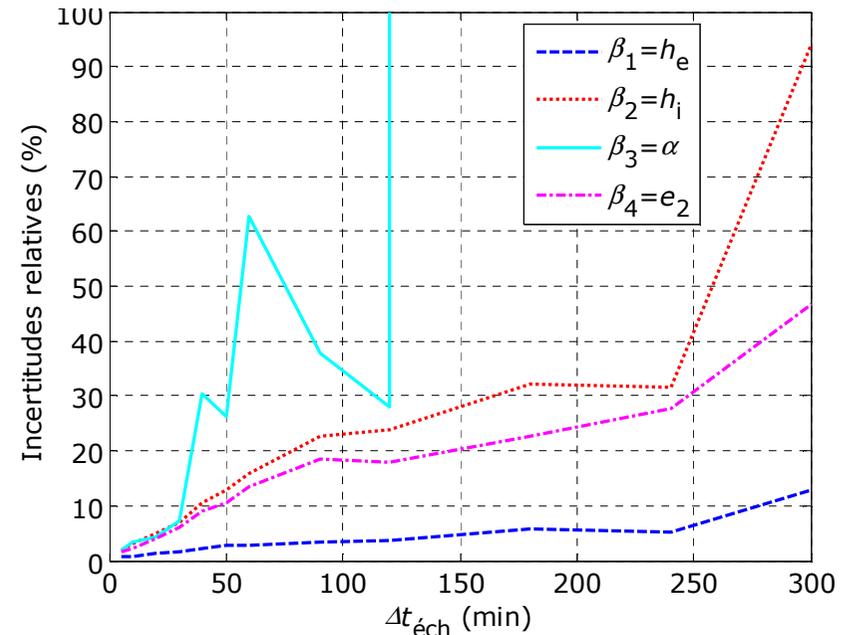
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Influence de la période d'échantillonnage :

Écart types moyens des résidus



Incertitudes relatives sur les paramètres estimés

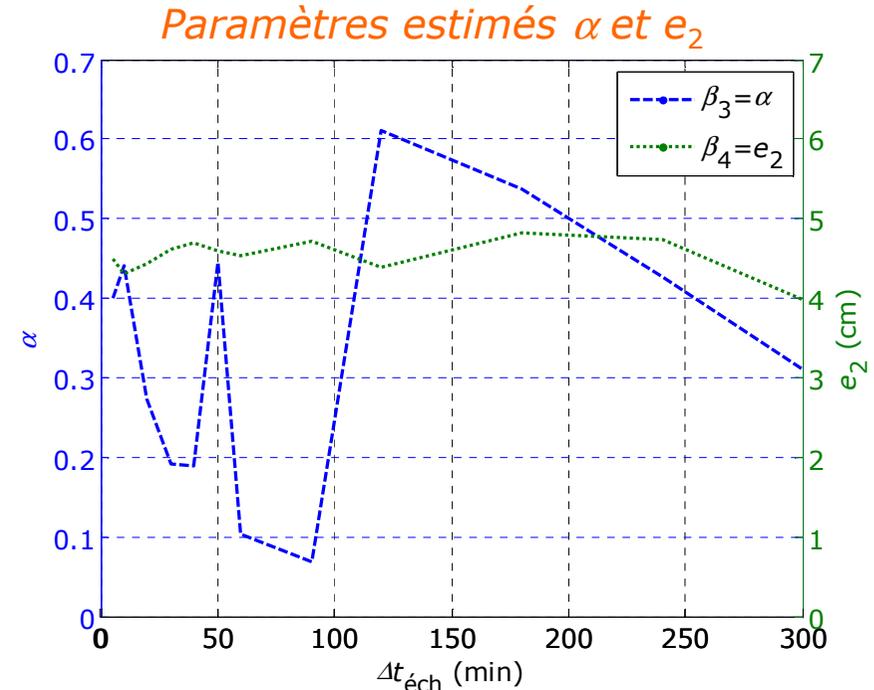
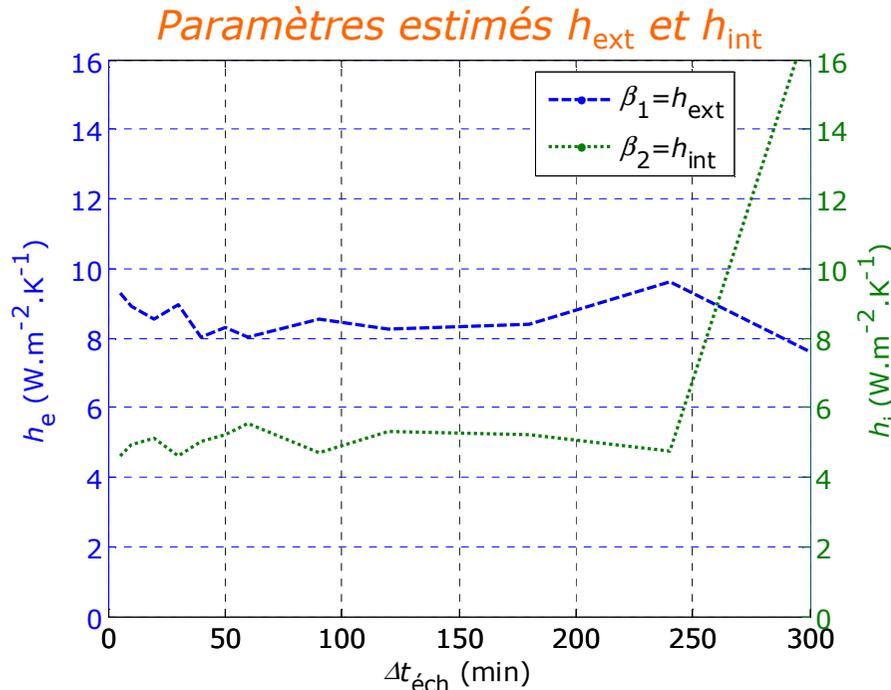


Identification à partir du gradient  $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$  en fonction de la période d'échantillonnage  $\Delta t_{éch}$

- ➔ L'écart type moyen des résidus est relativement peu dépendant de  $\Delta t_{éch}$  *excepté pour la plus grande période considérée (300 min)*
- ➔ Les niveaux d'incertitudes relatives augmentent avec  $\Delta t_{éch}$  *une incertitude relative inférieure à 20% sur l'épaisseur d'isolant  $e_2$  estimée est obtenue pour  $\Delta t_{éch} < 150$  min*

Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Influence de la période d'échantillonnage :



*Identification à partir du gradient  $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$  en fonction de la période d'échantillonnage  $\Delta t_{éch}$*

- ➔ Les coefficients d'échange identifiés  $h_{ext}$  et  $h_{int}$  semblent assez stables en fonction de  $\Delta t_{éch}$ , malgré une variation brusque pour  $\Delta t_{éch} = 300$ min
- ➔ L'épaisseur d'isolant  $e_2$  reste relativement inchangée
- ➔ Le facteur d'absorption est très dépendant de  $\Delta t_{éch}$

Merci pour votre attention