

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

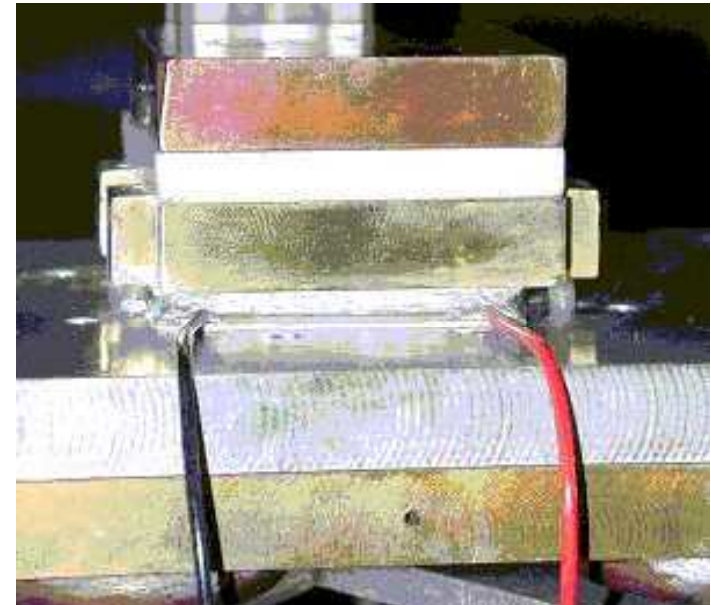
*Vincent FEUILLET, Mustapha KARKRI, Laurent IBOS,
Jean-Pierre MONCHAU, Mohamed LARBI YUCEF, Yves CANDAU
CERTES, Université Paris-Est*

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° C à 180° C)

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



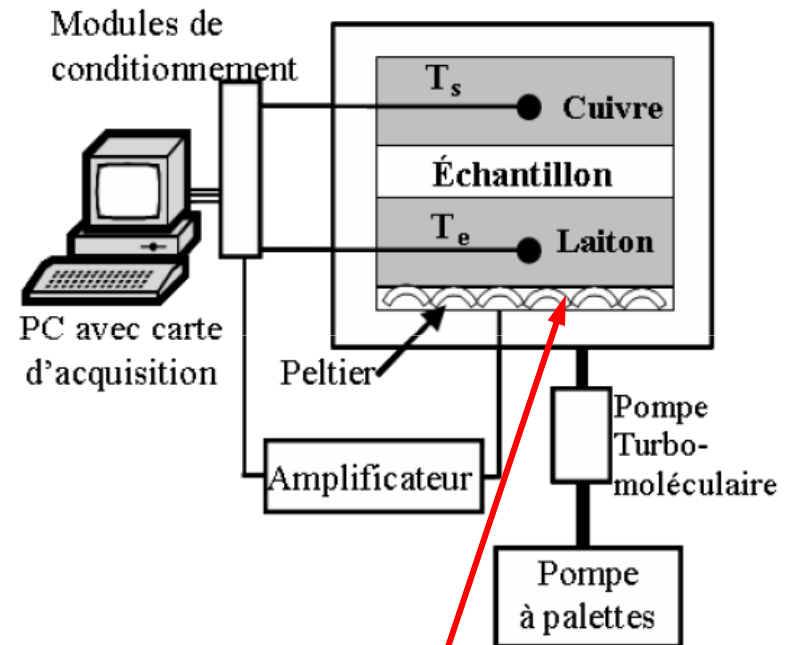
Vue du porte-échantillon du banc expérimental DICO

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 φ_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*

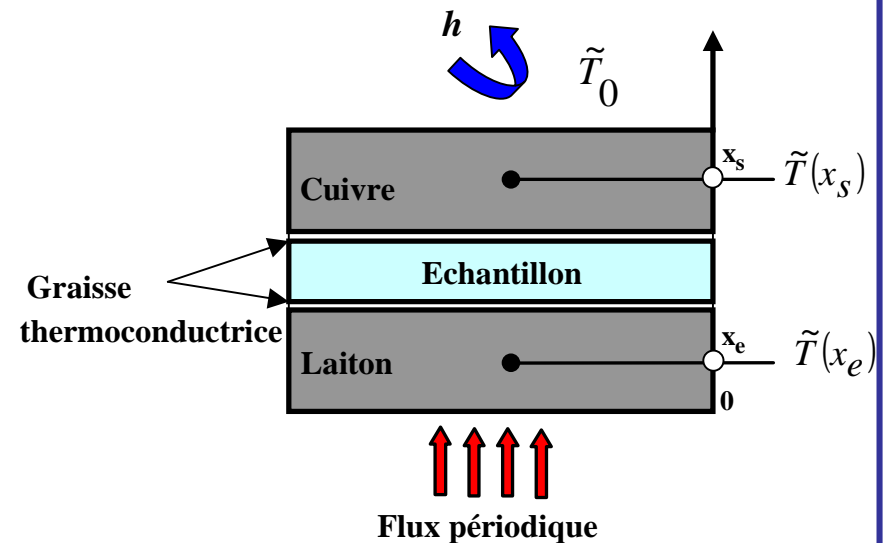
- Méthode des quadripôles thermiques :

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

- 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 :

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

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

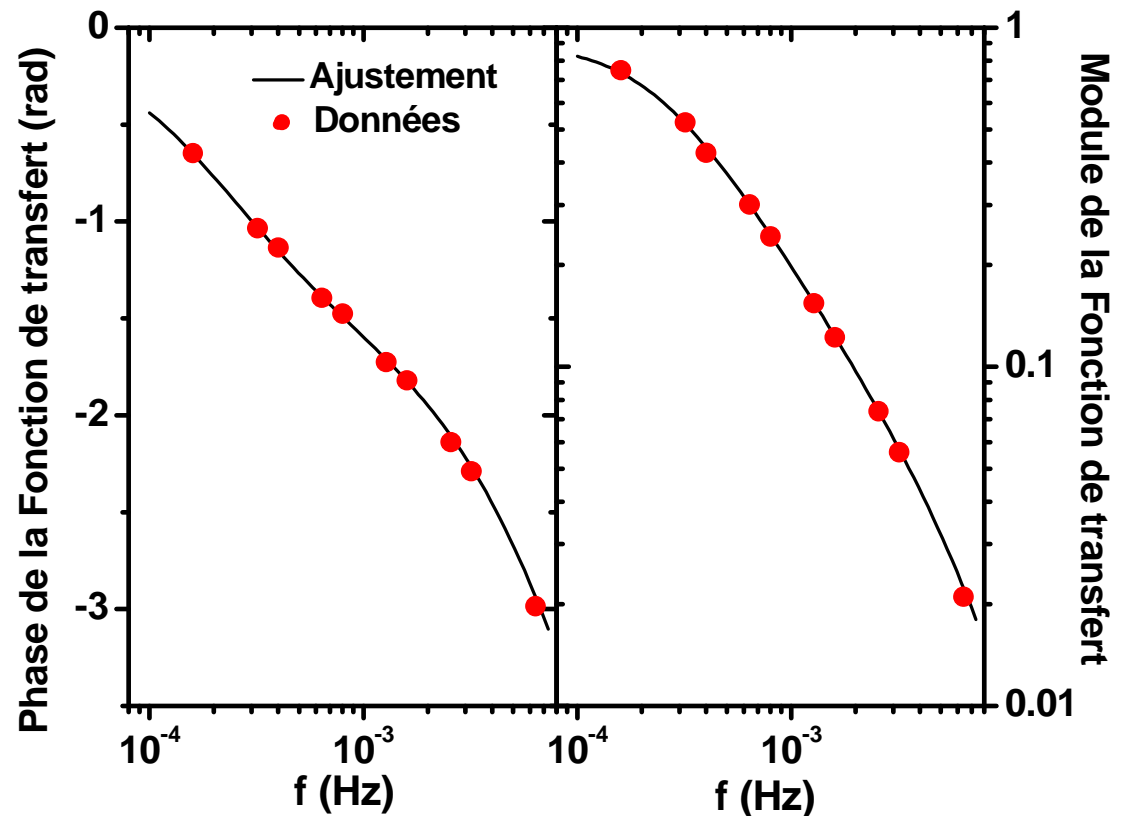
$$U(k)/k = 3\%$$

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

- Valeurs de la littérature :

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

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

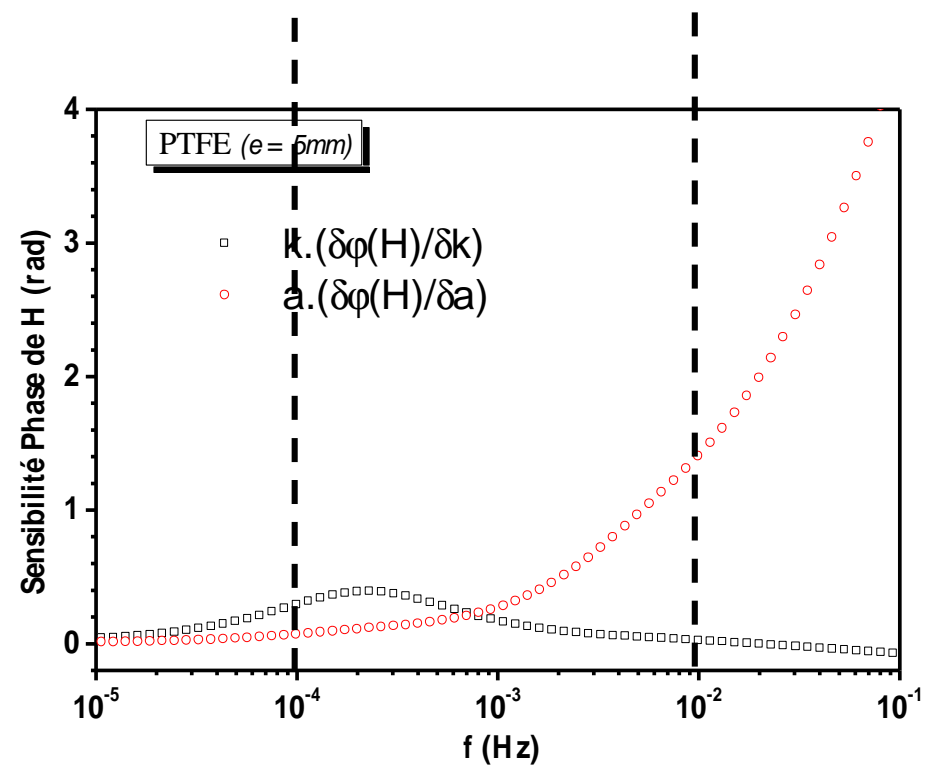
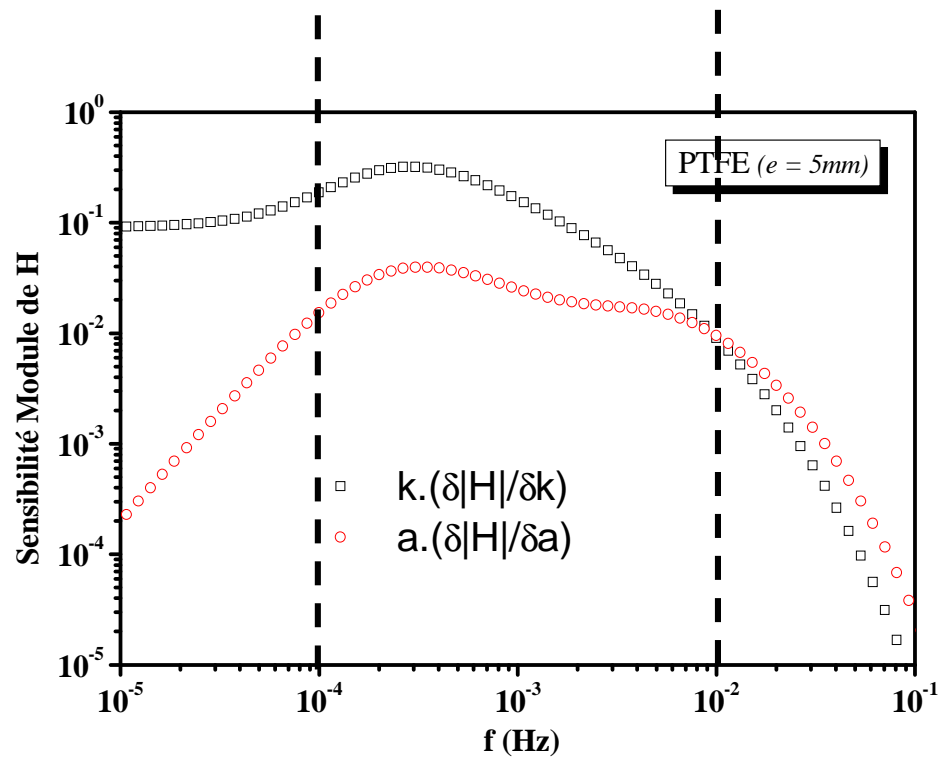


Thèse A. BOUDENNE (2003)

Caractérisation de matériaux composites

➤ Etude de sensibilité :

- Echantillon de PTFE de 5 mm d'épaisseur

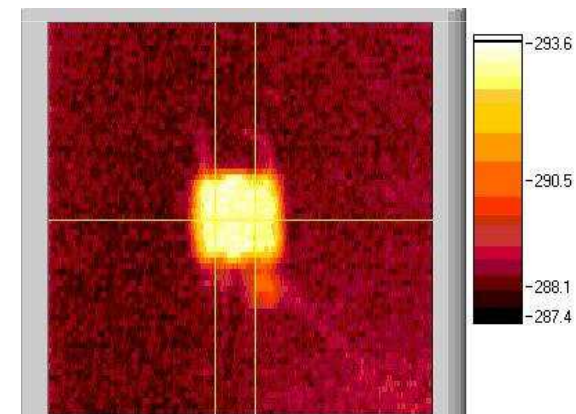


Caractérisation de matériaux composites

➤ **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***

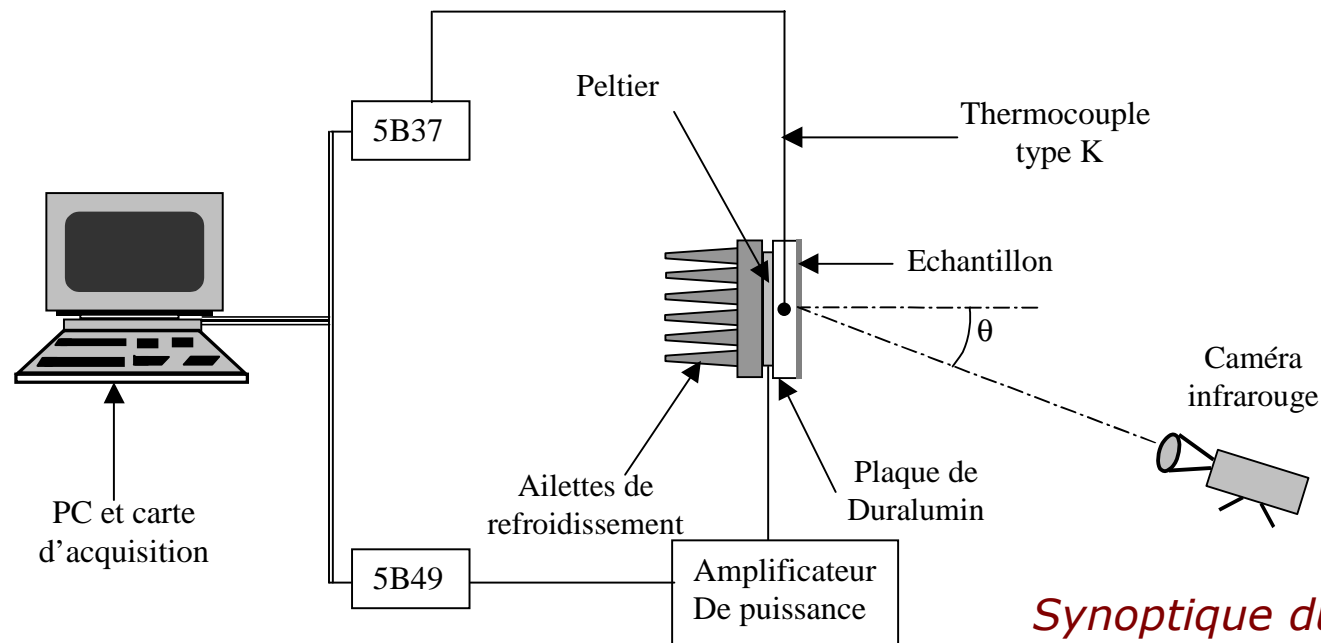


Vue du porte-échantillon avec un échantillon de PTFE en partie recouvert de peinture noire

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 :

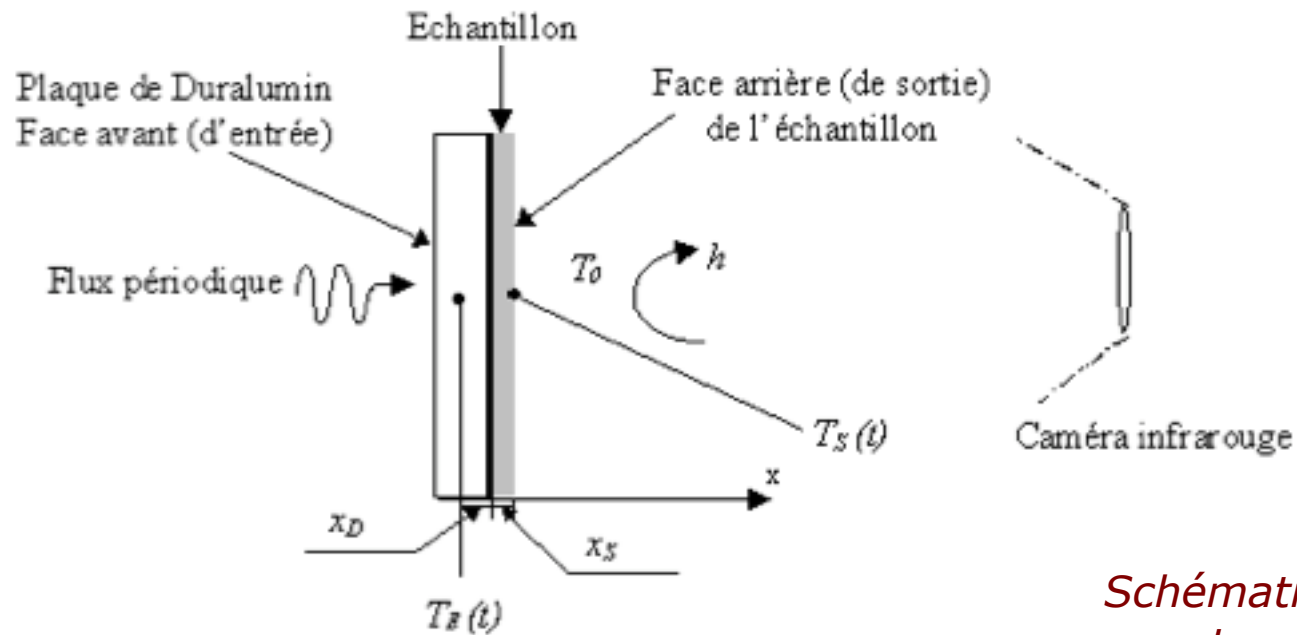
$$\epsilon_s = \epsilon_{ref} \cdot \frac{\bar{T}_{s,camera}^3 \Delta T_{s,camera}}{\bar{T}_{ref,camera}^3 \Delta T_{ref,camera}}$$

- 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)

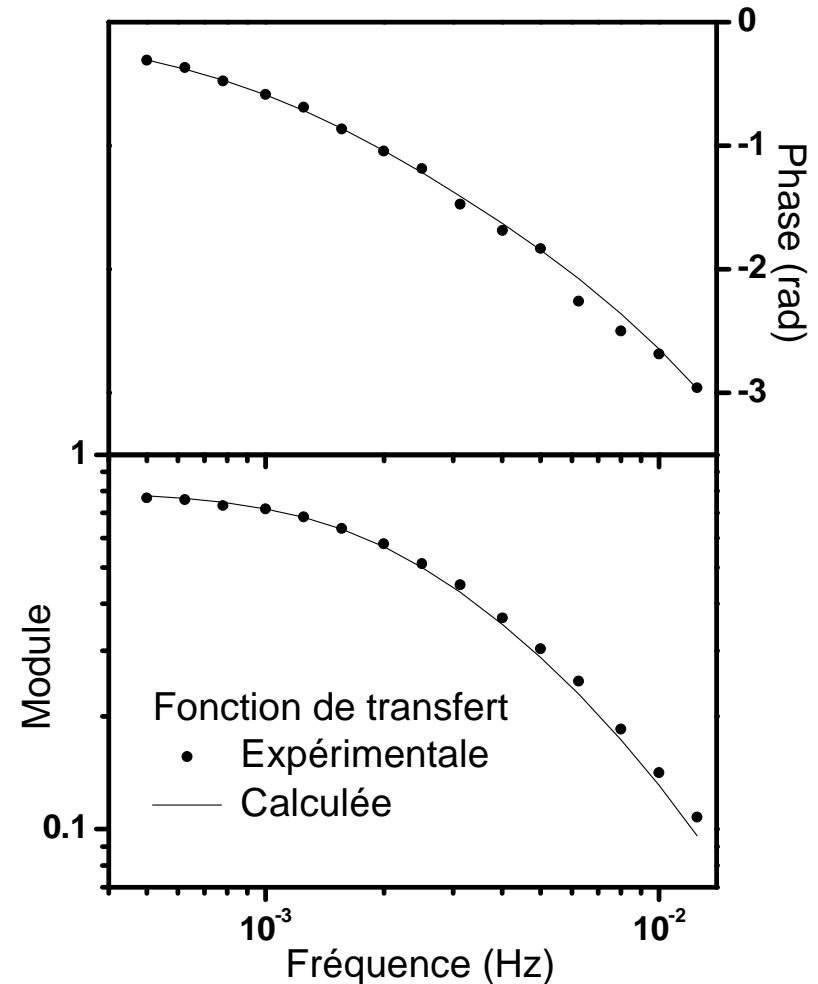


Schématisation des transferts

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 ± 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)

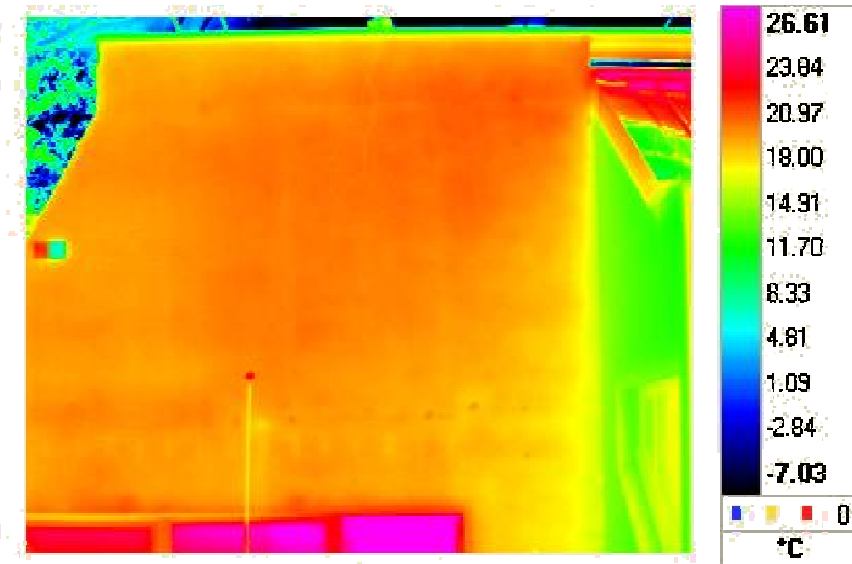


Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ **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***



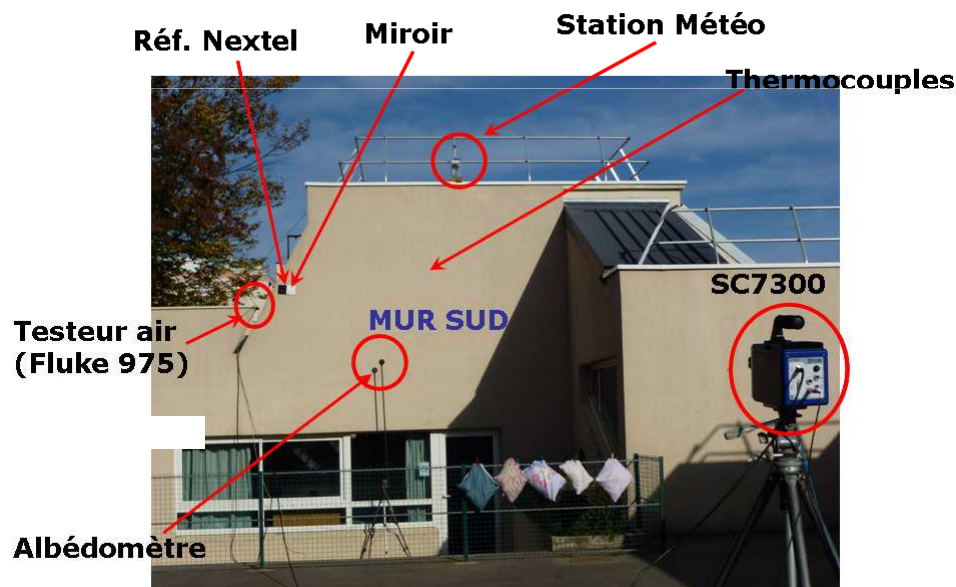
Contrôle de l'isolation de bâtiments

Choix de la façade :

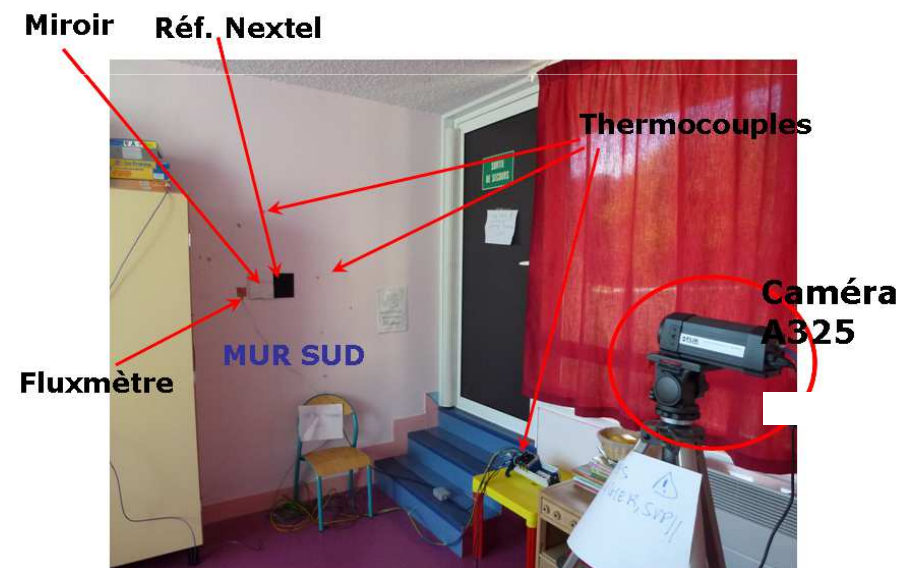
Mezzanine de deux classes: paroi orientée plein sud sans fenêtre, ni porte

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 :

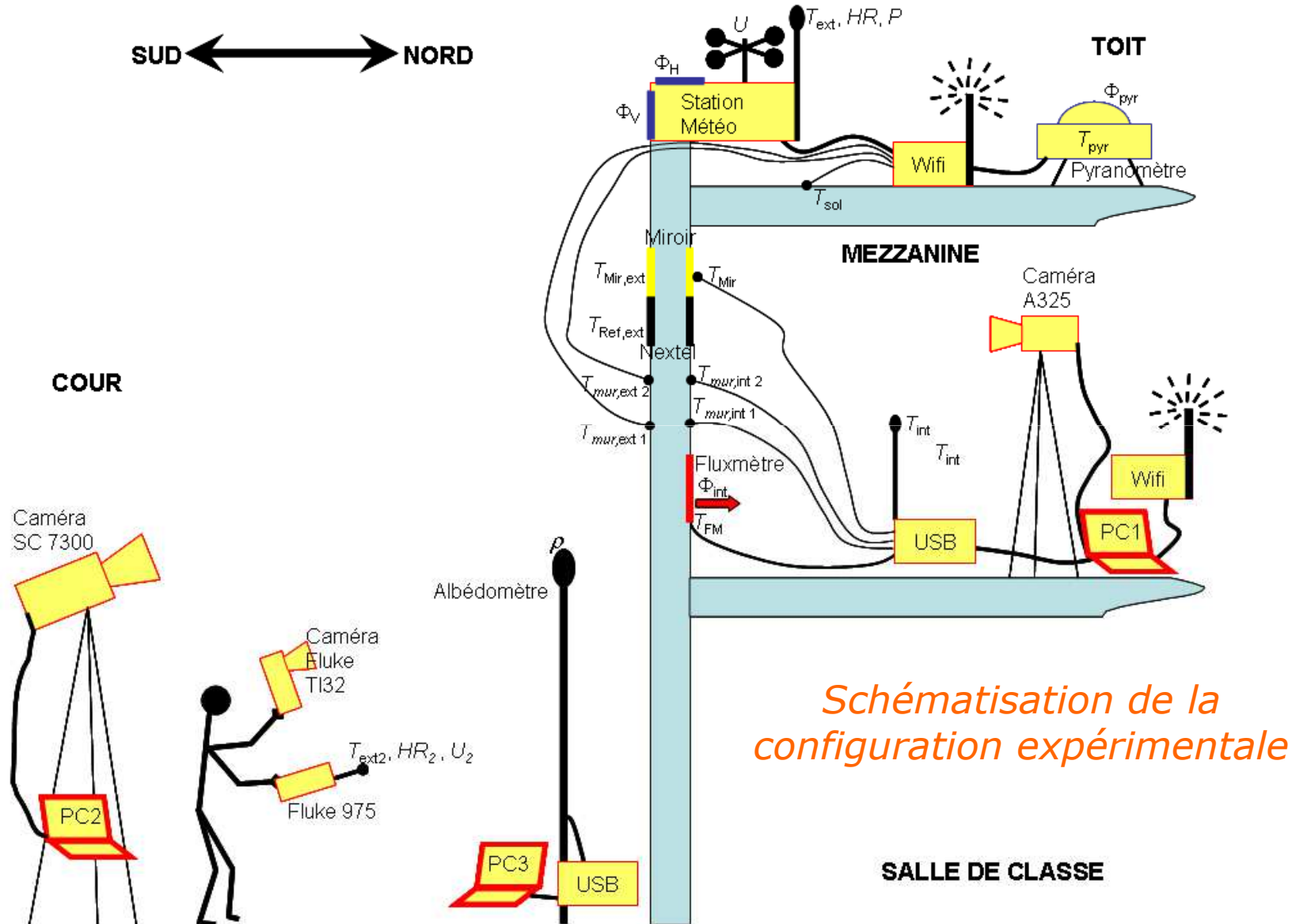
- *paramètres atmosphériques : station météo développée au CERTES*
- *températures de paroi ou d'éléments rapportés : caméras, thermocouples*
- *mesures additionnelles : paramètres atmosphériques locaux, albédo de la surface*

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*

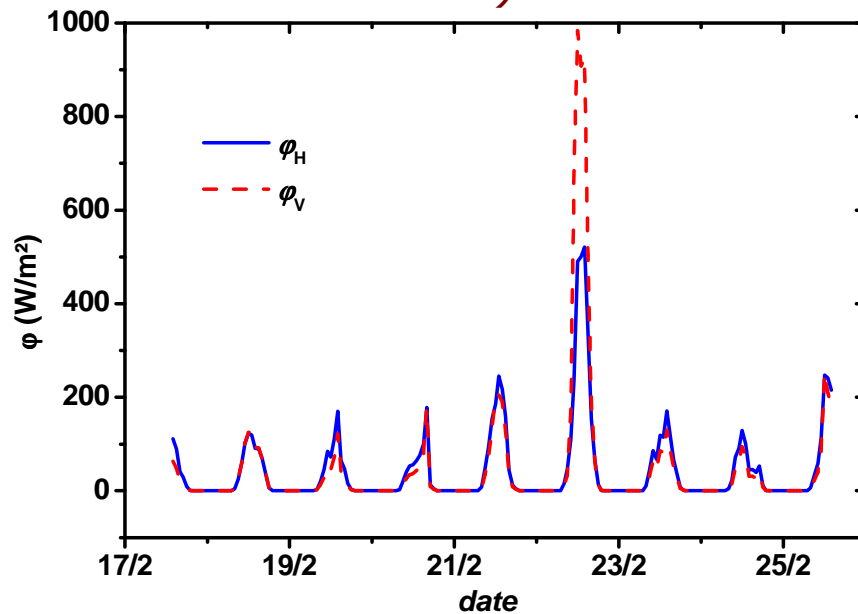
Contrôle de l'isolation de bâtiments



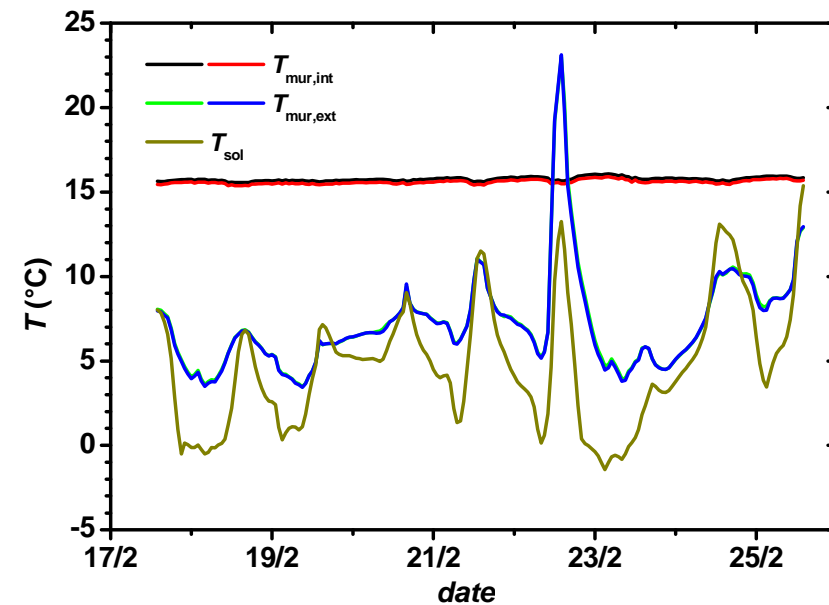
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Caractéristiques des mesures de février 2011 :

- Eclairage 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

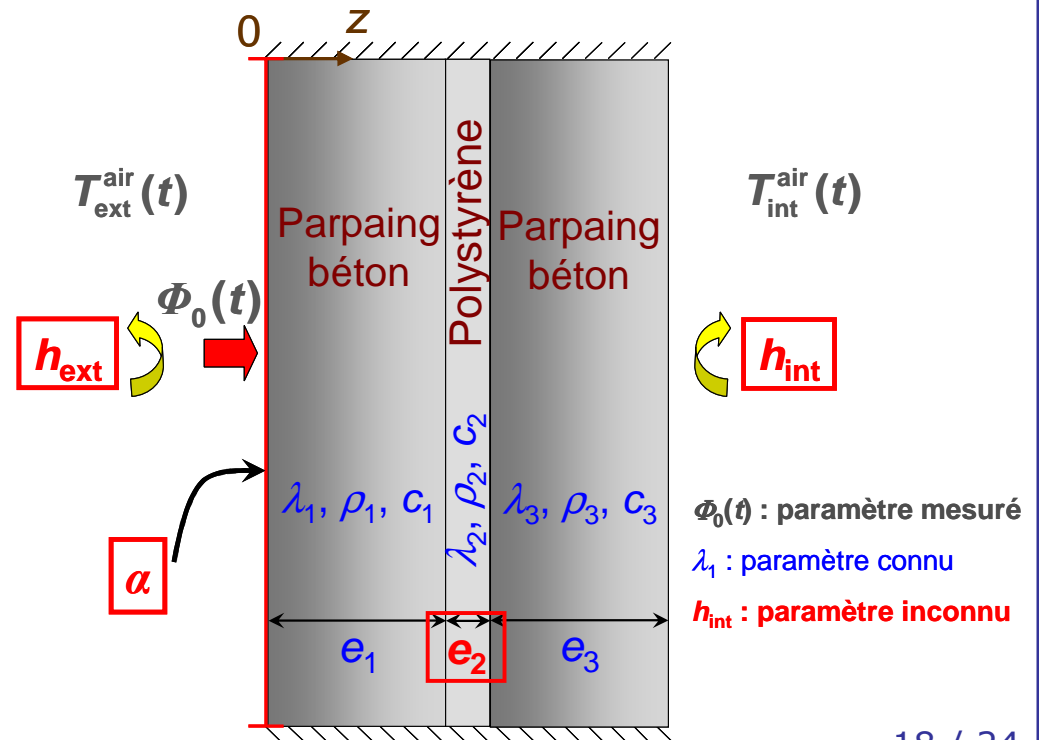
Contrôle de l'isolation de bâtiments

- 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>i</i>	<i>e_i</i> (cm)	λ_i (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	ρ_i (kg.m ⁻³)	c_i (J.K ⁻¹ .kg ⁻¹)
Parpaing béton (<i>i</i> =1)	16	1.15	1900	1000
Polystyrène (<i>i</i> =2)	4	0.038	20	1450
Parpaing béton (<i>i</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} ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	α	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

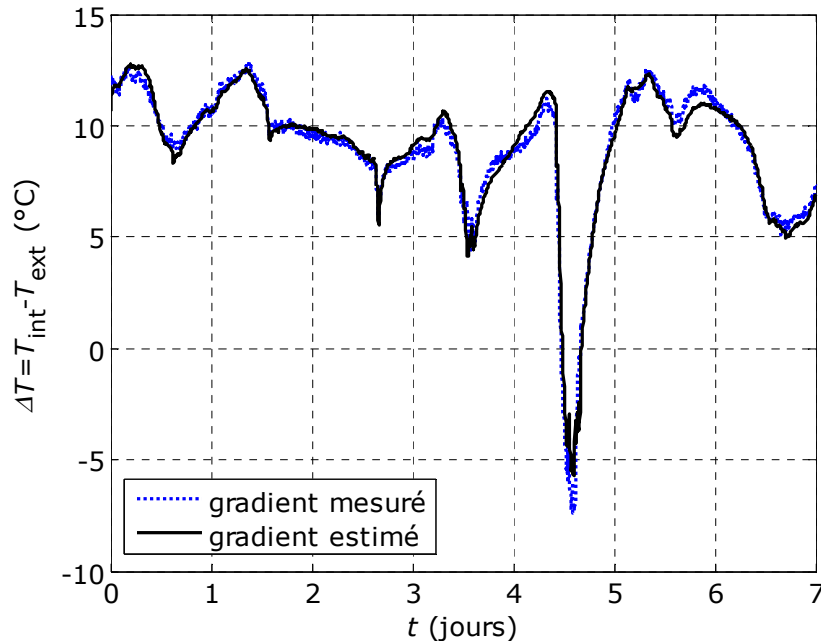
→ Analyse sur le gradient :

e_2 proche de l'épaisseur réelle d'isolant

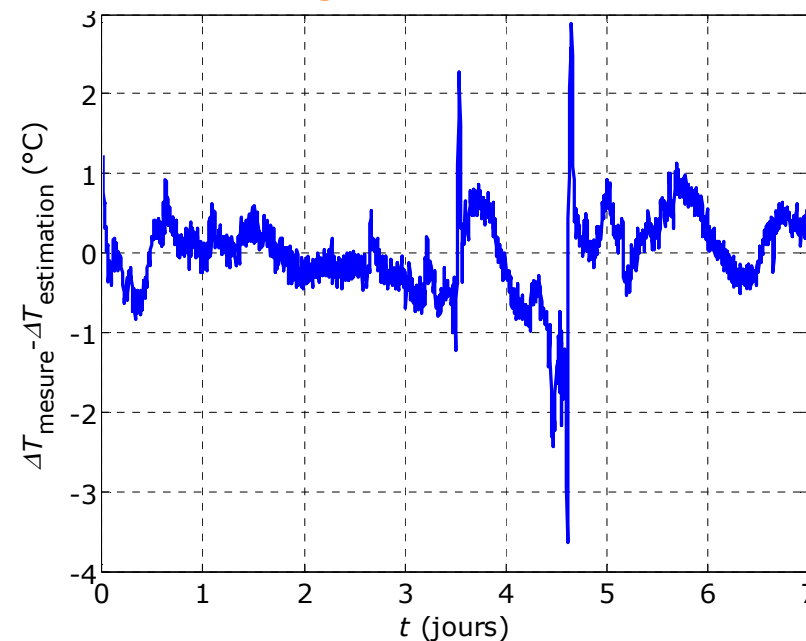
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ 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

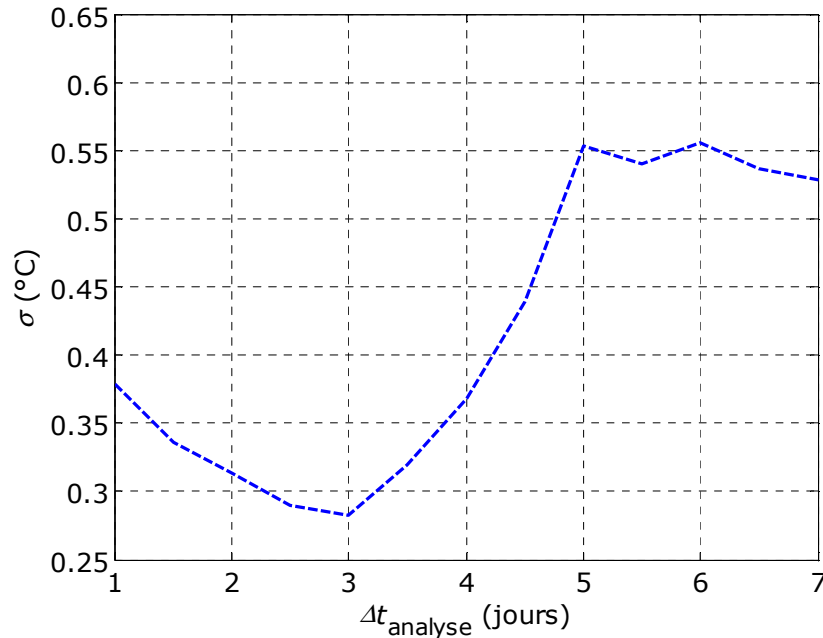
- Bonne concordance entre gradients mesuré et calculé après identification
- Faibles résidus, en grande majorité $< 1^\circ$ C en valeur absolue
- Quelques écarts plus importants coïncidant avec des variations brusques et importantes d'ensoleillement :

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

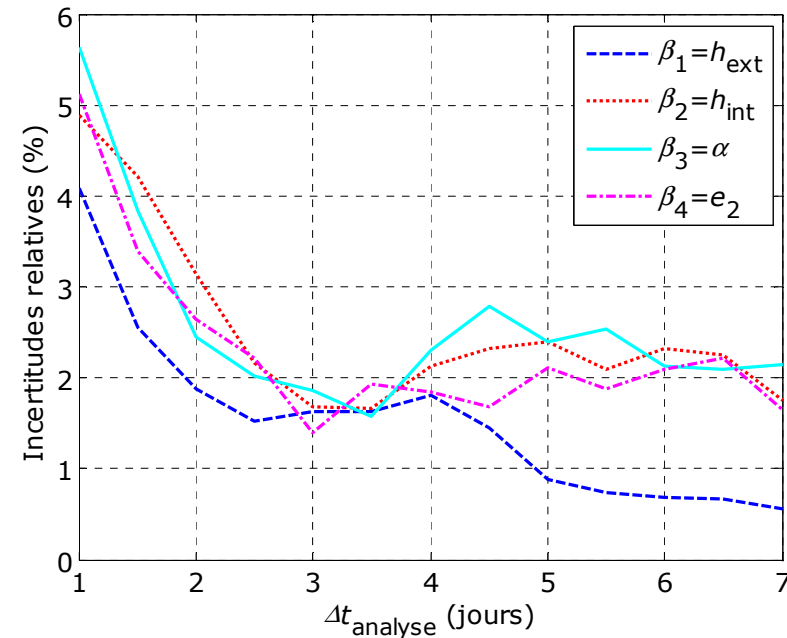
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Influence de la durée d'analyse :

Écarts types moyens des résidus



Incertitudes relatives sur les paramètres estimés



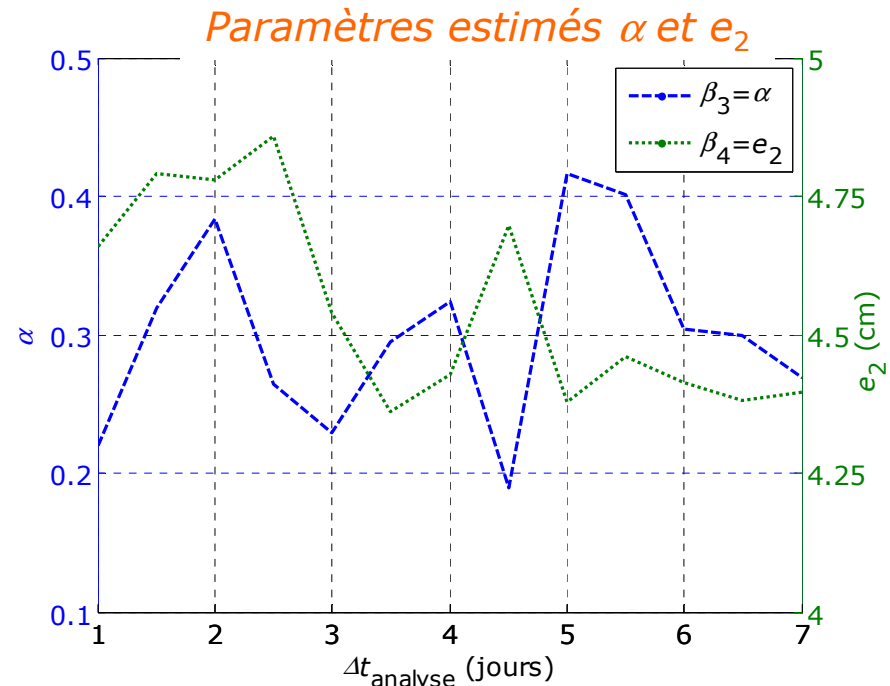
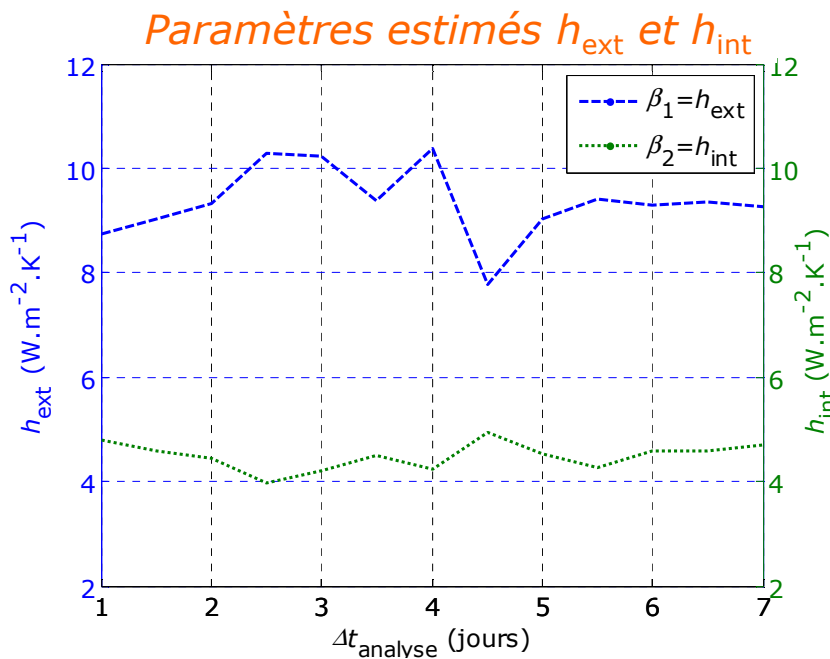
Identification à partir du gradient $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$ en fonction de la durée d'analyse
 $\Delta t_{\text{analyse}} = t_{\text{final}} - t_0$

→ 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 :



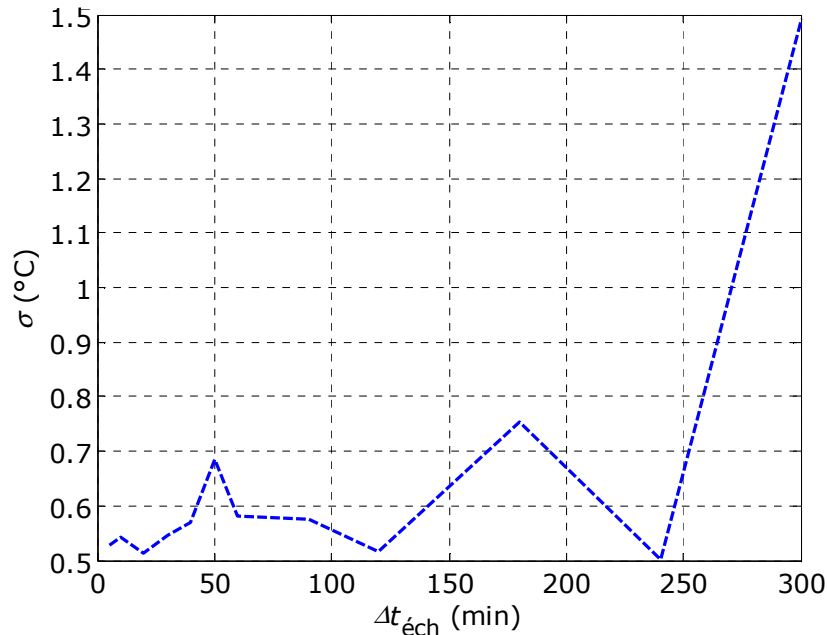
Identification à partir du gradient $\Delta T = T_{int} - T_{ext}$ en fonction de la durée d'analyse $\Delta t_{analyse} = t_{final} - t_0$

- ➔ 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 α significative

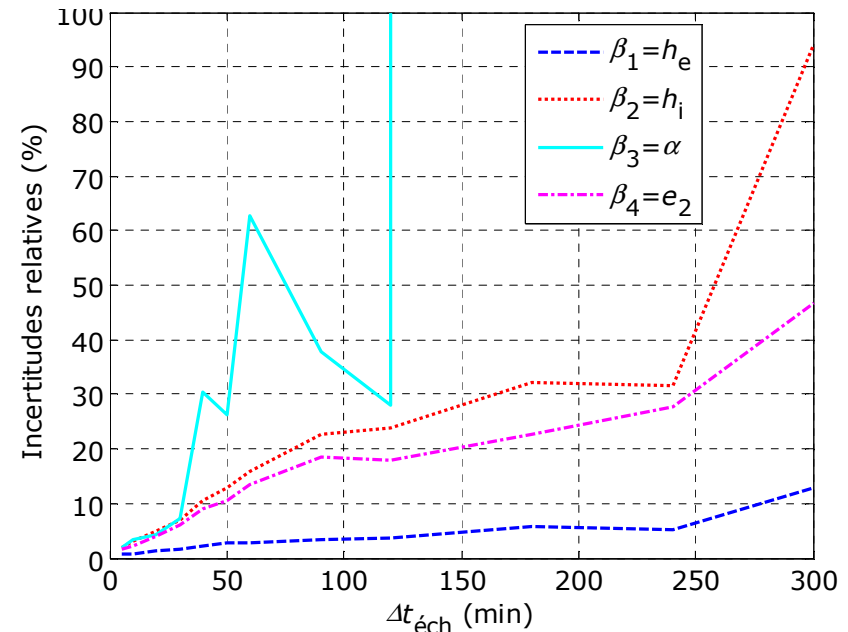
Contrôle de l'isolation de bâtiments

➤ Influence de la période d'échantillonnage :

Écarts types moyens des résidus



Incertitudes relatives sur les paramètres estimés

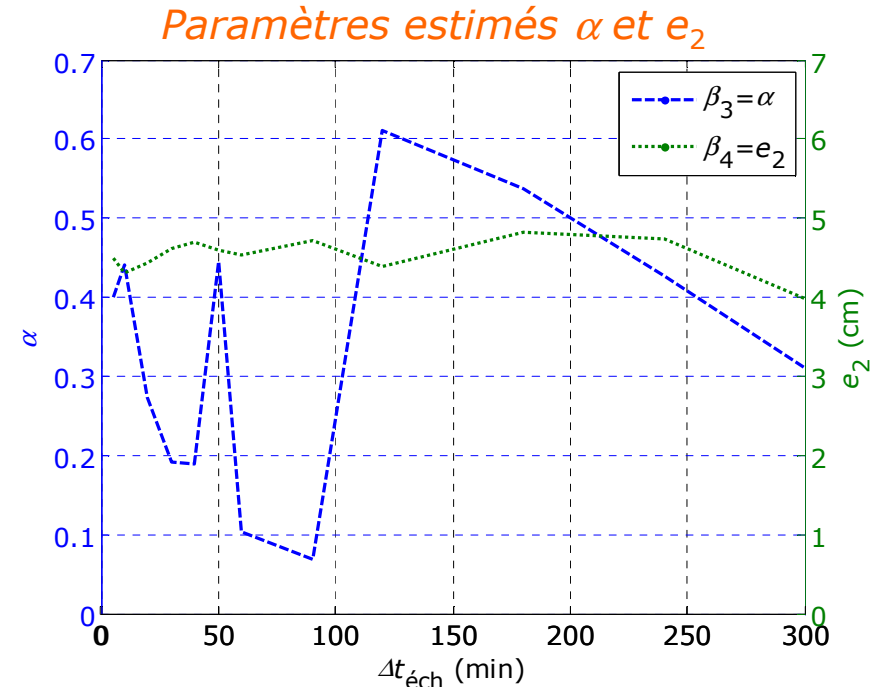
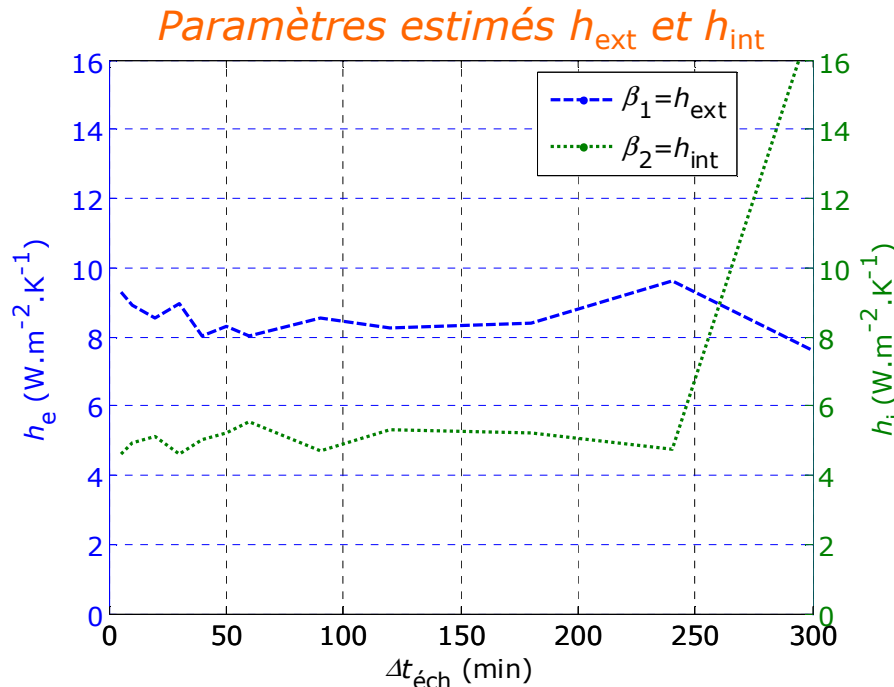


Identification à partir du gradient $\Delta T = T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}$ en fonction de la période d'échantillonnage $\Delta t_{\text{éch}}$

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