

Comparaison de méthodes de mesure de coefficients d'échanges en surface de parois de bâtiment

Laurent IBOS (ibos@u-pec.fr), **Vincent FEUILLET**
CERTES / Université Paris-Est Créteil

Adrien FRANÇOIS, Johann MEULEMANS
Saint-Gobain Recherche Paris



Plan de l'exposé

Présentation générale

- Contexte des travaux et Motivations
- Hypothèses et principes généraux
- Panorama des méthodes de mesure retenues

Mise en œuvre des méthodes

- Dispositif expérimental
- Principes physiques
- Méthodes de calcul de h
- Exemples de résultat

Synthèse

- Résultats en régime permanent
- Résultats en régime transitoire
- Conclusions & Perspectives



Contexte des travaux

Diagnostic quantitatif in-situ de l'isolation thermique de parois de bâtiments



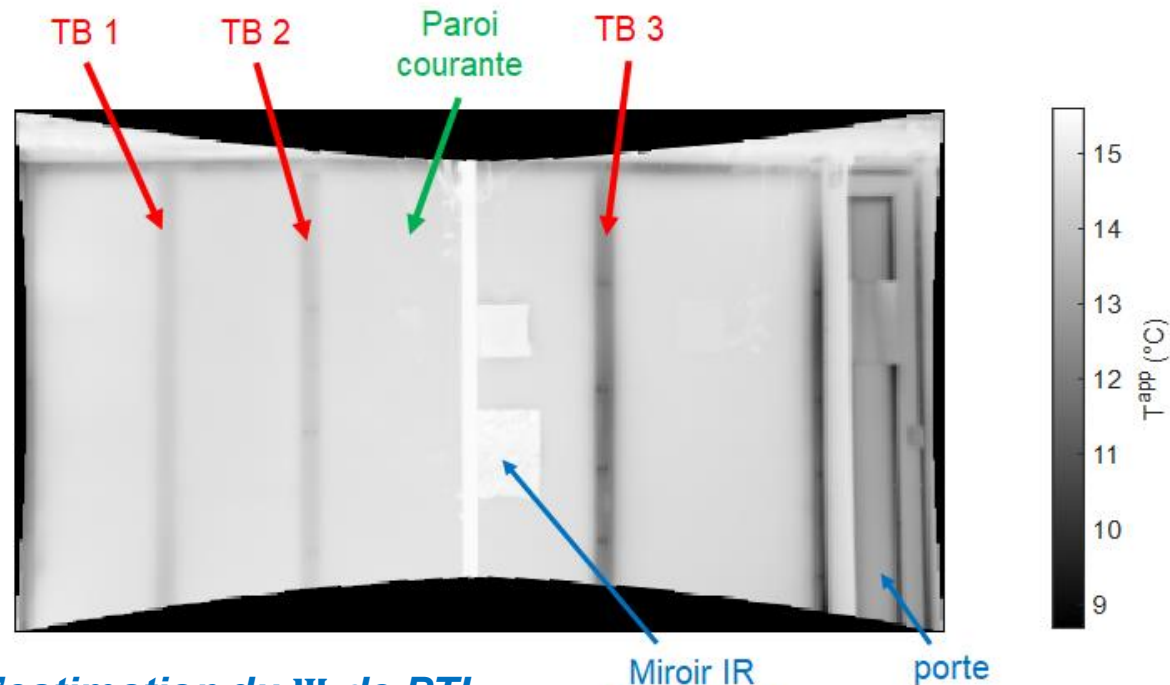
Méthode active (chauffage du local) et observation de la paroi par thermographie



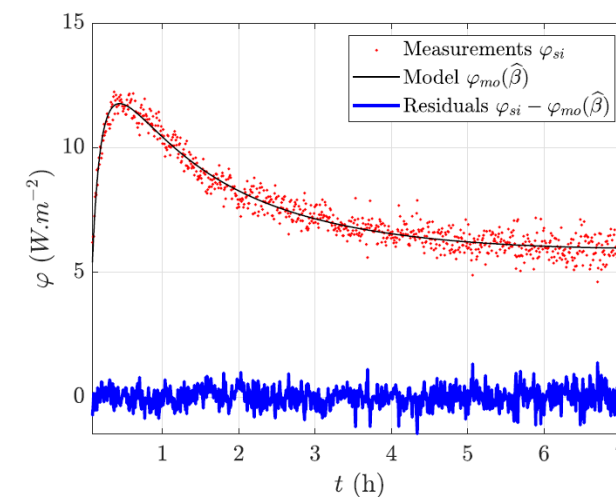
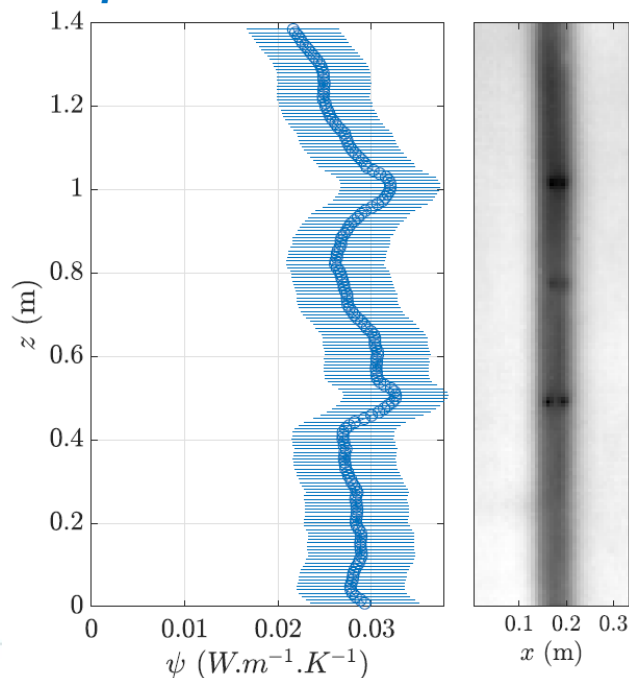
Correction de champs de température de surface + Flux pariétal



Utilisation d'une méthode inverse pour estimer le coefficient de transmission thermique de la paroi / de ponts thermiques



Exemple d'estimation du Ψ de PTI



Motivation de la mesure in-situ de h

On dispose d'une mesure ponctuelle de flux en surface de la paroi (à l'aide d'un fluxmètre)

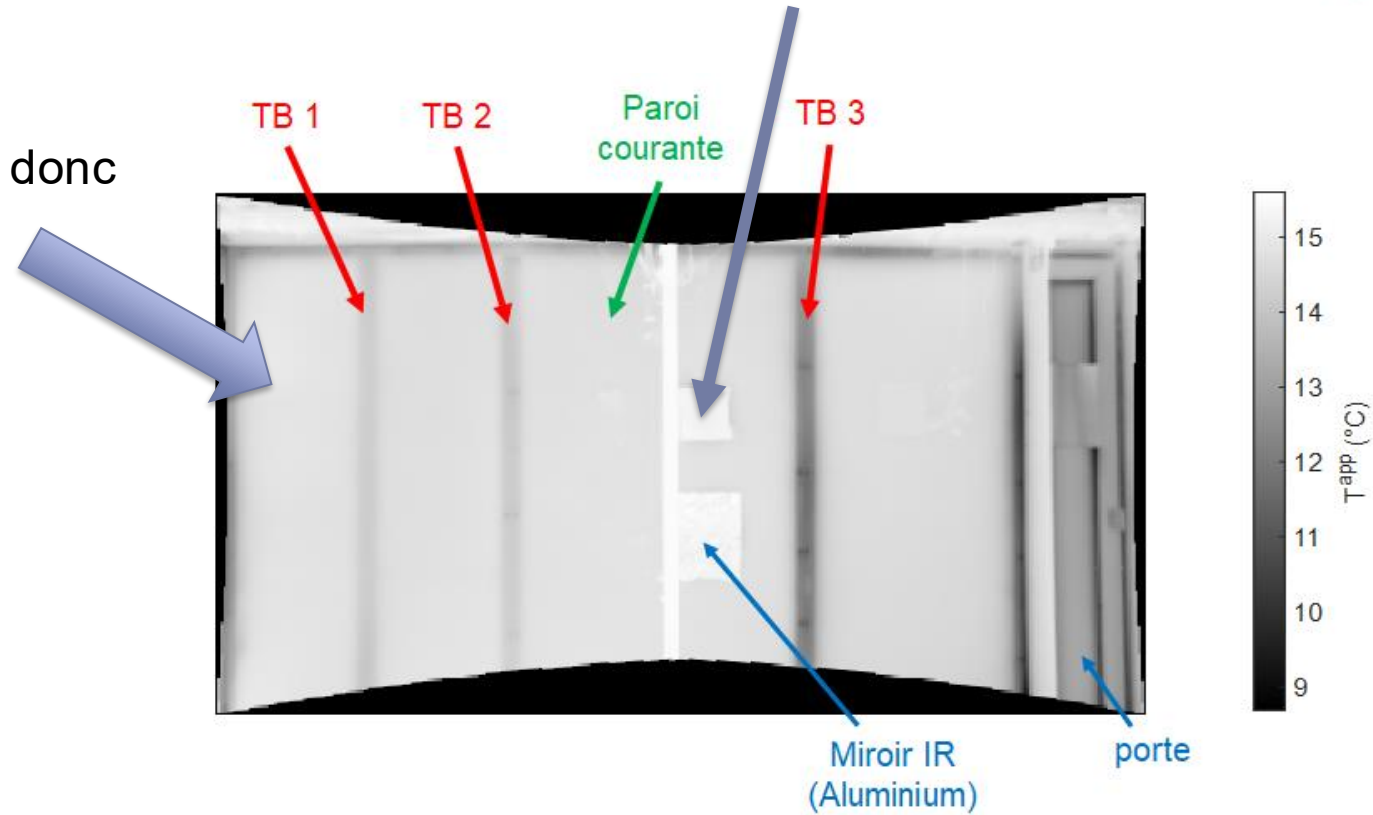


On dispose d'une image thermique corrigée, donc d'un champ de température de surface



Possibilité d'obtention d'une image en flux?

Nécessité de connaissance du coefficient d'échange en surface de la paroi



Hypothèses et principes généraux

Cas de mesure sur parois de bâtiments:

- Faibles écarts de température sur la surface et entre la surface et l'ambiance: température d'air (T_{air}) ou température moyenne de l'environnement radiatif (T_{env})
- Possibilité de linéarisation des échanges

Densité de flux en surface: $\varphi = h \times (T_{surface} - T_{op})$

Coefficient d'échange global h (convection + rayonnement):

$$h = h_c + h_r$$

Température opérative T_{op} : $T_{op} = \frac{h_c T_{air} + h_r T_{env}}{h}$

Coefficient d'échange par rayonnement h_r :

$$h_r \approx 4\varepsilon\sigma\overline{T_m}^3$$

$$\text{Avec } h_r = (T_{surface} + T_{env})/2$$



Méthodes testées – principes généraux

3 familles de méthodes (5 méthodes au total)

Basées sur une mesure différentielle de flux

DM1:
Double mesure active

DM2:
Double mesure passive

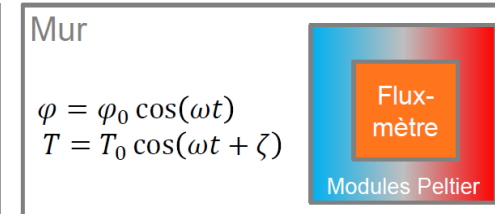
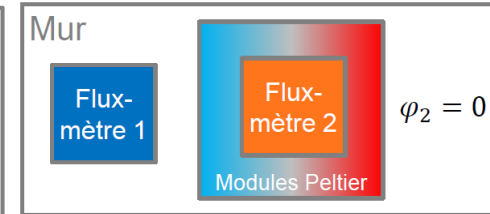
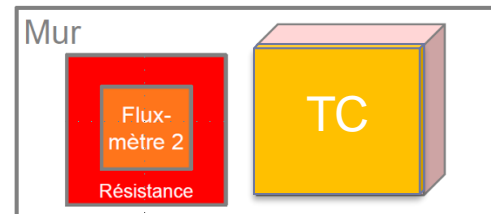
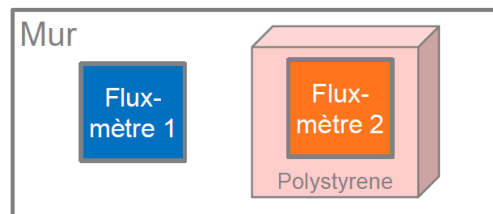
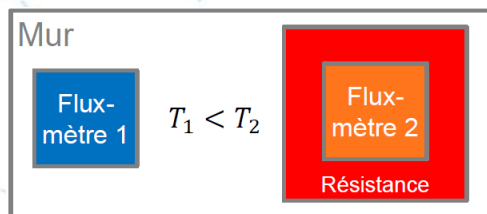
Basées sur la mesure de la température opérative

OT1:
Méthode ISO 9869-2

OT2:
Méthode du flux nul

Élimination des valeurs statiques

HE:
Excitation en régime harmonique



Plan de l'exposé

Présentation générale

- Contexte des travaux et Motivations
- Hypothèses et principes généraux
- Panorama des méthodes de mesure retenues

Mise en œuvre des méthodes

- Dispositif expérimental
- Principes physiques
- Méthodes de calcul de h
- Exemples de résultat

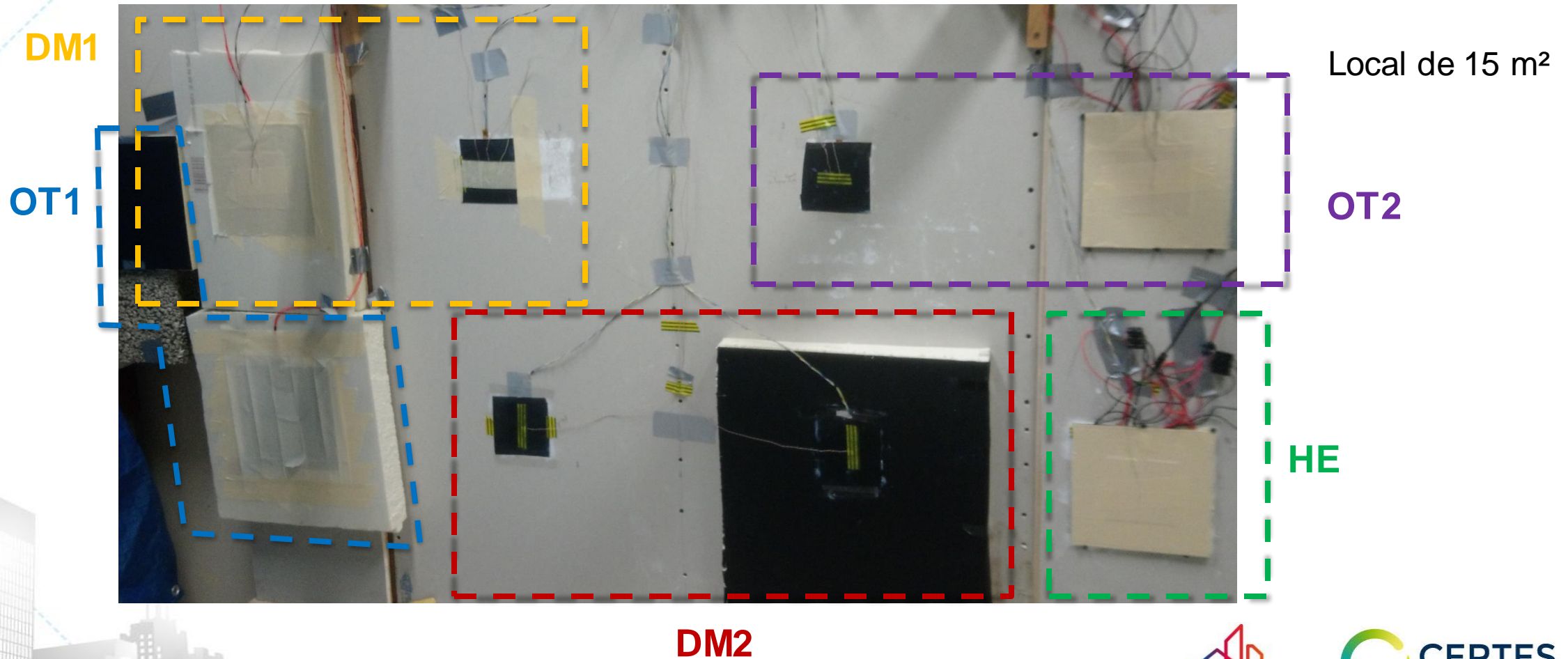
Synthèse

- Résultats en régime permanent
- Résultats en régime transitoire
- Conclusions & Perspectives



Méthodes testées – développement expérimental

Utilisation de fluxmètres $100 \times 100 \text{ mm}^2$, disposés sur une paroi intérieure de bâtiment et recouverts d'une feuille de papier (même émissivité que le reste du mur). Leur température est mesurée grâce à un thermocouple type T intégré.



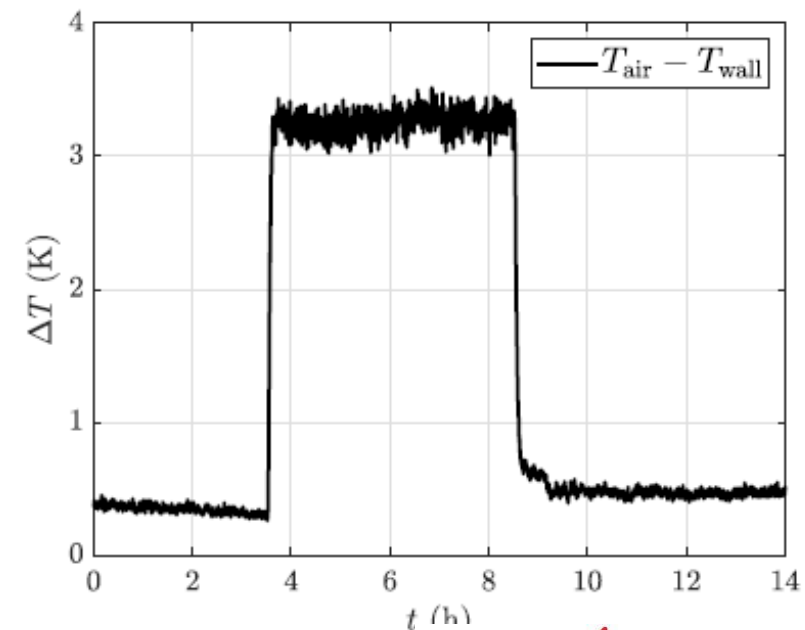
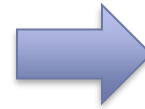
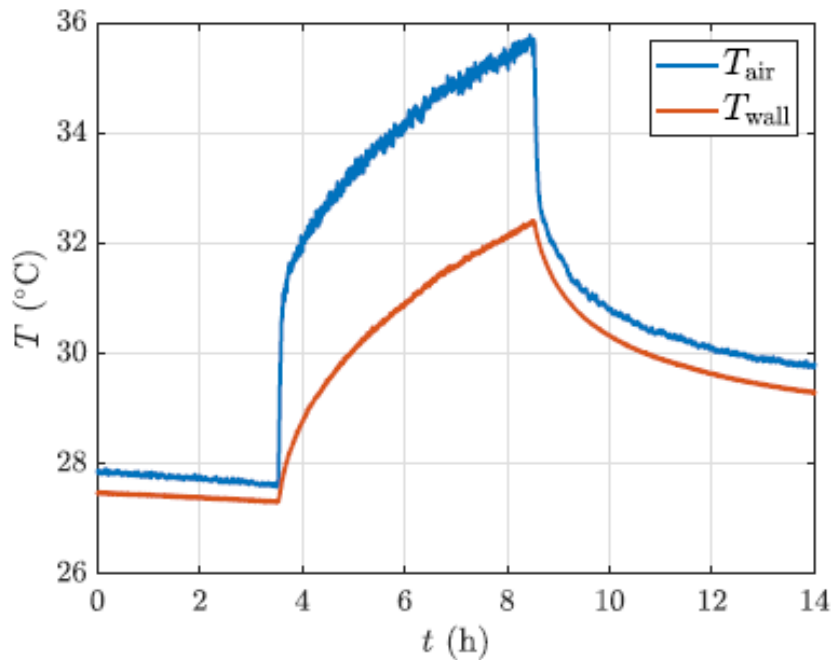
Méthodes testées – Modes de fonctionnement

Régime « statique » (évolution de température libre)

- Pas de système de chauffage: mesure en continu pendant plusieurs heures / jours

Régime transitoire: 3 phases

- État initial (pas de chauffage du local)
- Période de chauffage (5 heures): utilisation de radiateurs soufflants (chauffage « rapide »)
- Période de « relaxation »: extinction des radiateurs (environ 5 heures)



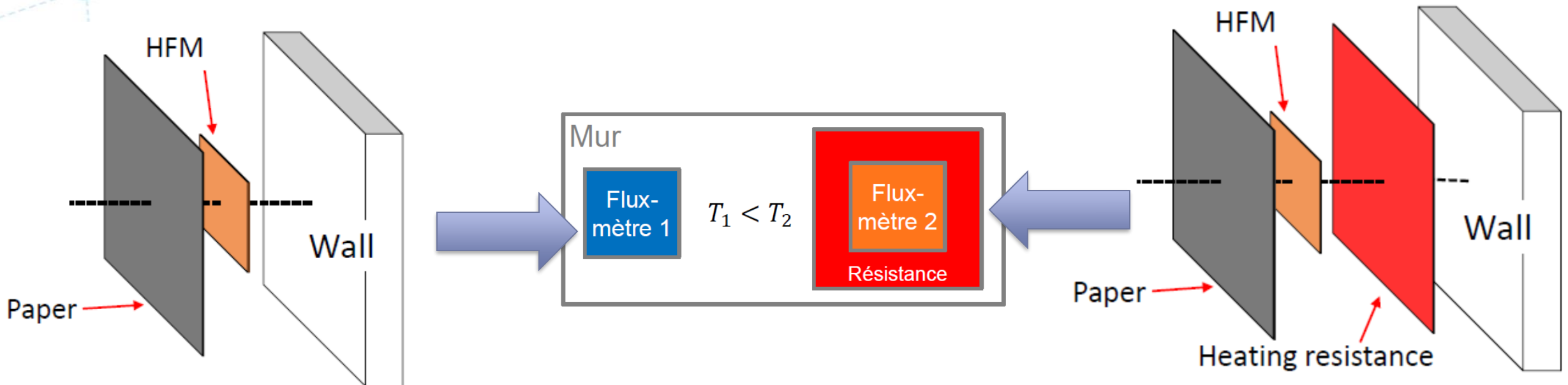
Méthodes testées – Méthode DM1

Fluxmètres identiques à proximité l'un de l'autre et à la même altitude sur la paroi

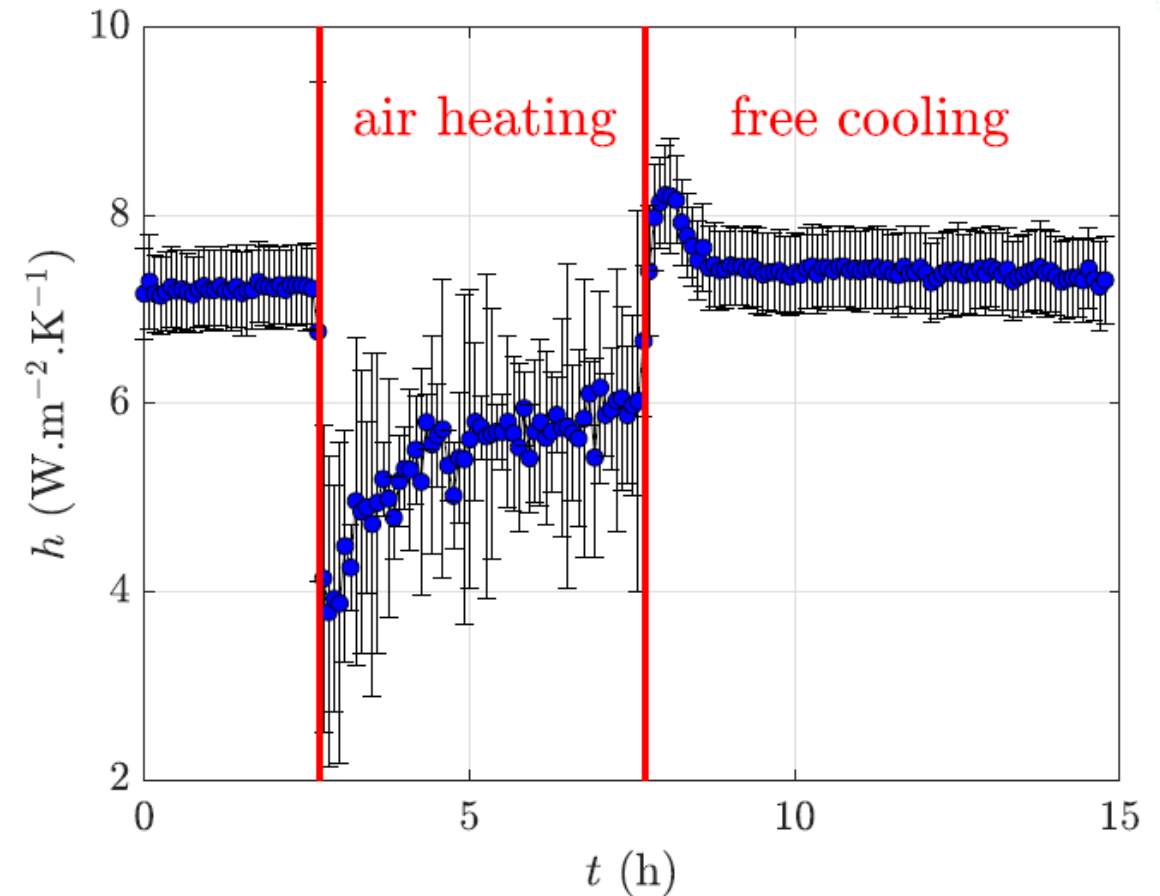
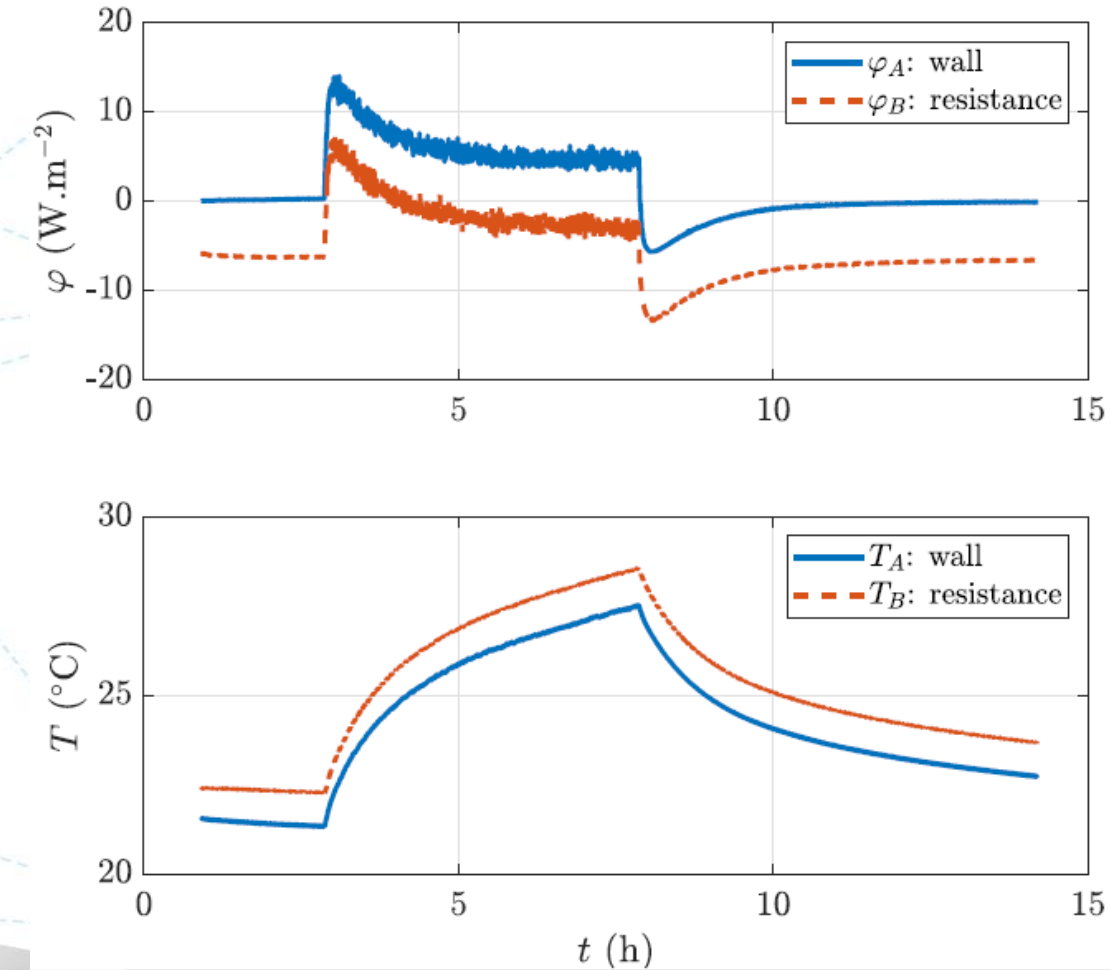
On place sous le deuxième fluxmètre une résistance chauffante, alimentée de manière à créer une augmentation de température d'environ 1°C

On obtient:

$$h = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{T_2 - T_1}$$



Méthodes testées – Méthode DM1



Méthodes testées – Méthode DM2

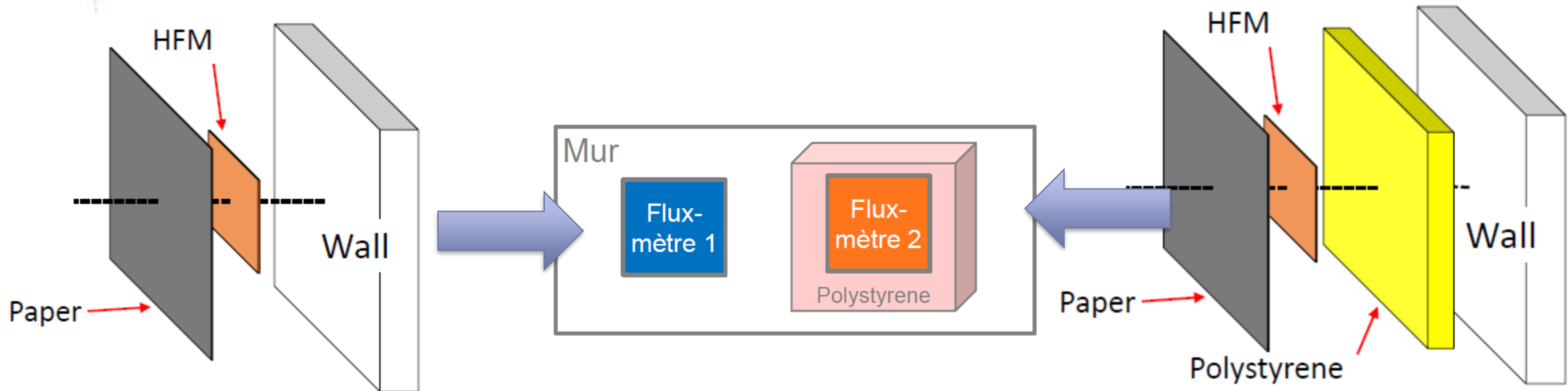
Fluxmètre 1 similaire à celui de la méthode DM1

Sous le deuxième fluxmètre on remplace la résistance chauffante par une plaque isolante en polystyrène (ce matériau doit avoir une effusivité thermique différente de la paroi)

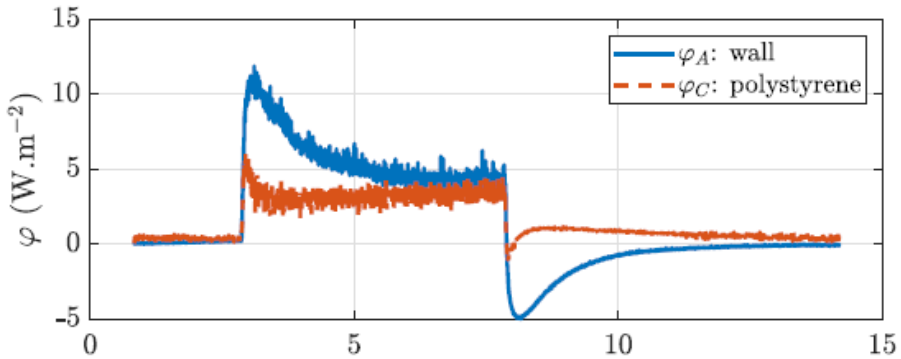
Toute variation de température de l'ambiance intérieure induira une différence de température et de flux entre les deux fluxmètres

On obtient h par régression linéaire:

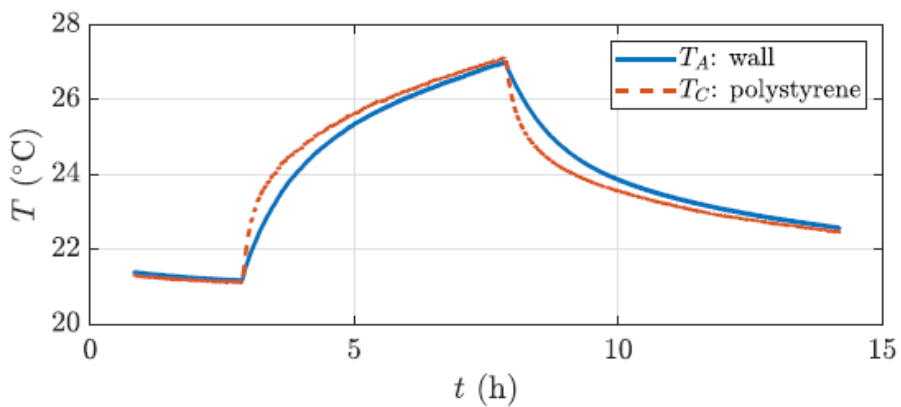
$$\varphi_2 - \varphi_1 = h \times (T_2 - T_1)$$



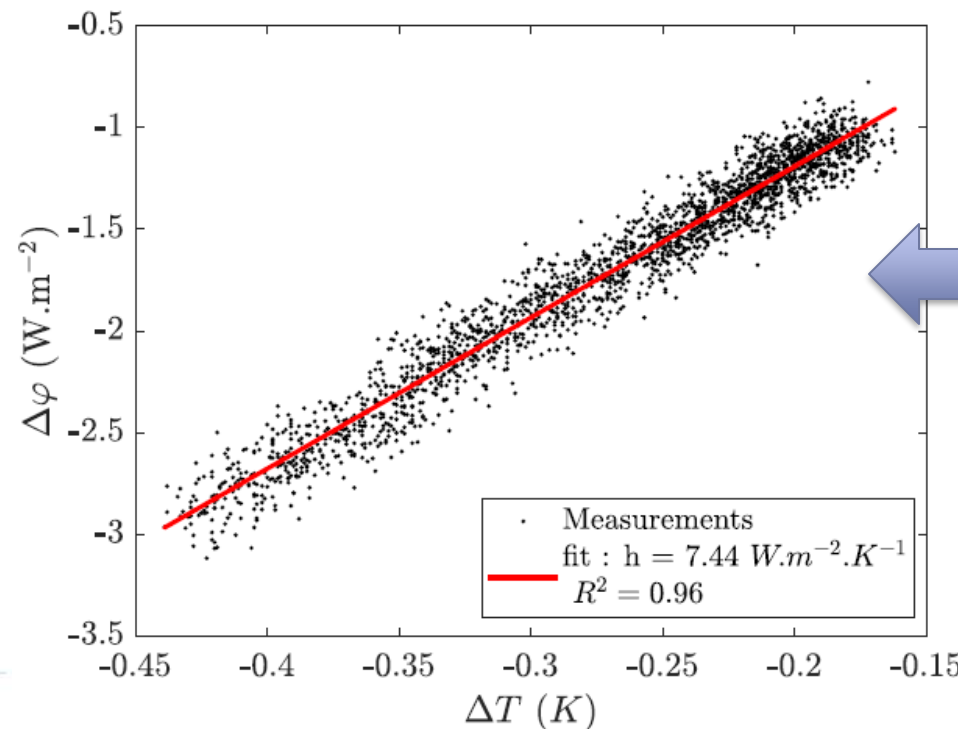
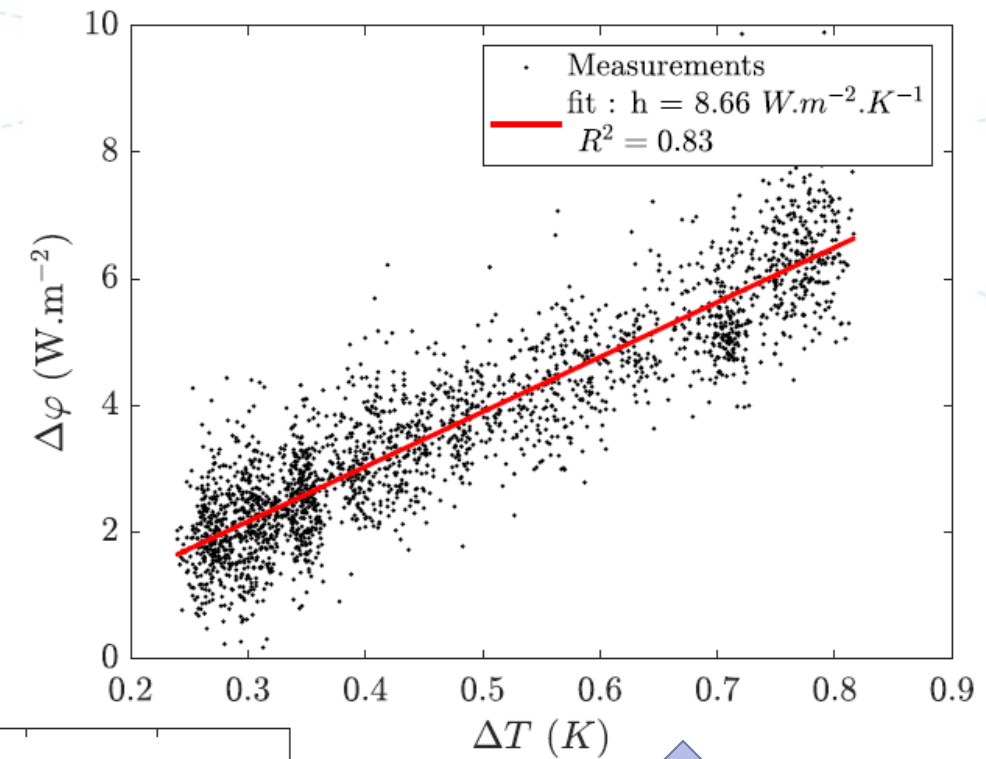
Méthodes testées – Méthode DM2



Période de
chauffage



Période de
refroidissement



Détermination de h par
régression linéaire



Méthodes testées – Méthode OT1

Fluxmètre 2 (avec résistance chauffante) similaire à celui de la méthode DM1

2^{ème} dispositif, défini dans la norme ISO 9869-2 pour déterminer la température opérative: thermocouple placé entre un panneau isolant et une plaque en cuivre recouverte d'un revêtement à forte émissivité

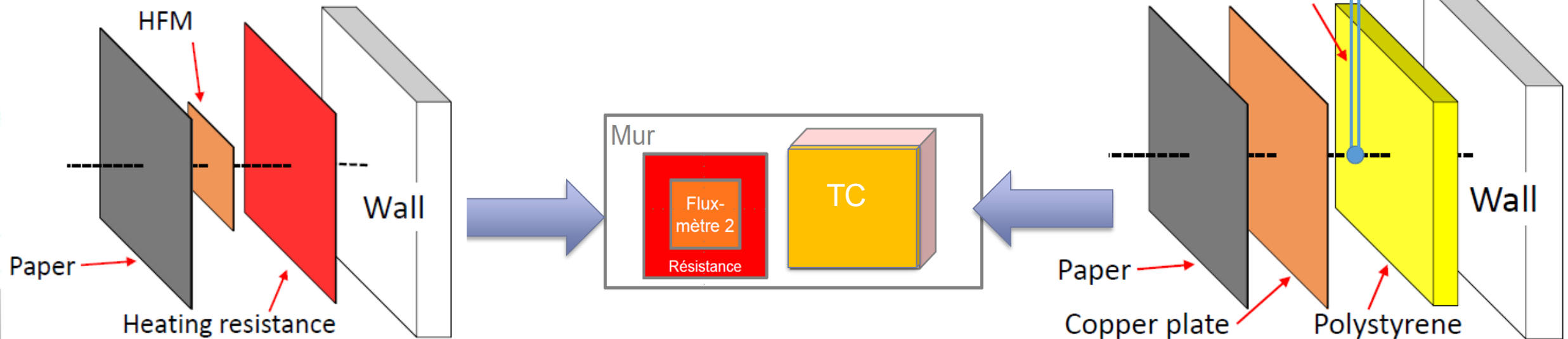
Ce deuxième dispositif ne doit pas être en contact avec la surface de la paroi (en équilibre thermique avec l'air et l'environnement radiatif): la température mesurée est la température opérative

On obtient:

$$h = \frac{\varphi_2}{T_2 - T_{op}}$$

(Calcul direct ou régression linéaire)

Méthode non utilisable en régime transitoire



Méthodes testées – Méthode OT2

Dispositif utilisant des modules à effet Peltier (TEC) placés entre 2 plaques métalliques (uniformisation du flux).

Un fluxmètre est placé sur le dispositif (flux φ_2).

Un autre est placé sur la paroi (flux φ_1).

Régulation en permanence de la tension d'alimentation des modules Peltier de manière à obtenir un flux φ_2 nul.

Dans ces conditions, la température du fluxmètre 2 est égale à la température opérative:

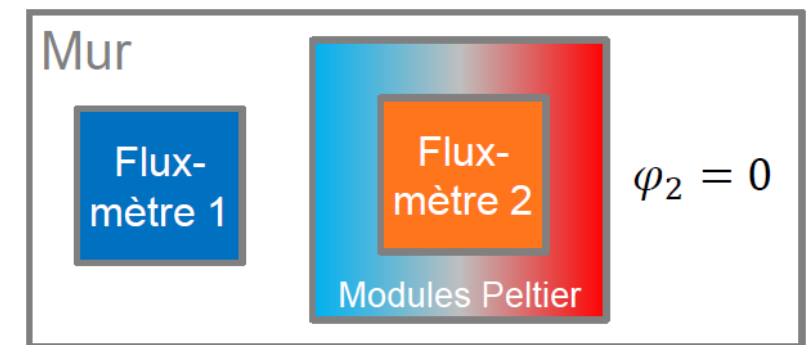
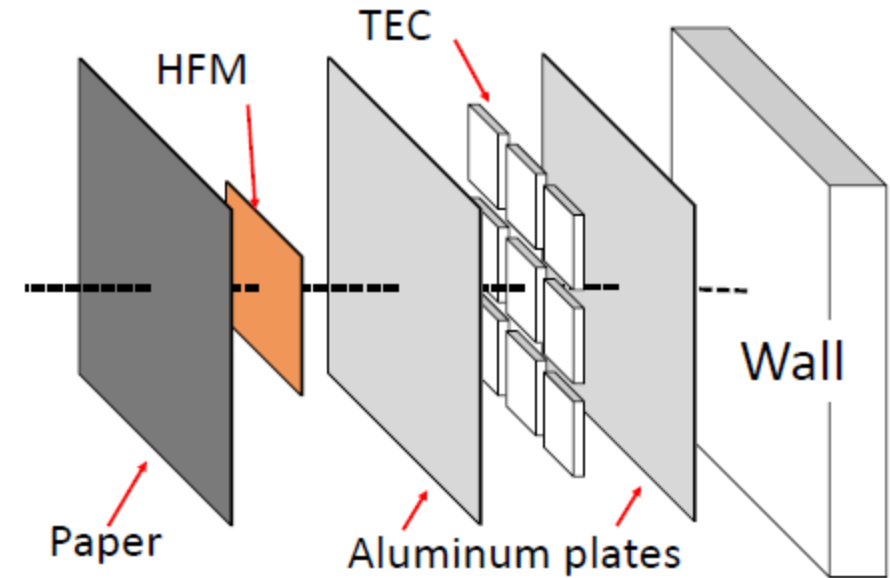
$$T_{op} = T_2$$

On obtient h à partir du fluxmètre 1 et de T_{op} :

$$h = \frac{\varphi_1}{T_1 - T_{op}}$$

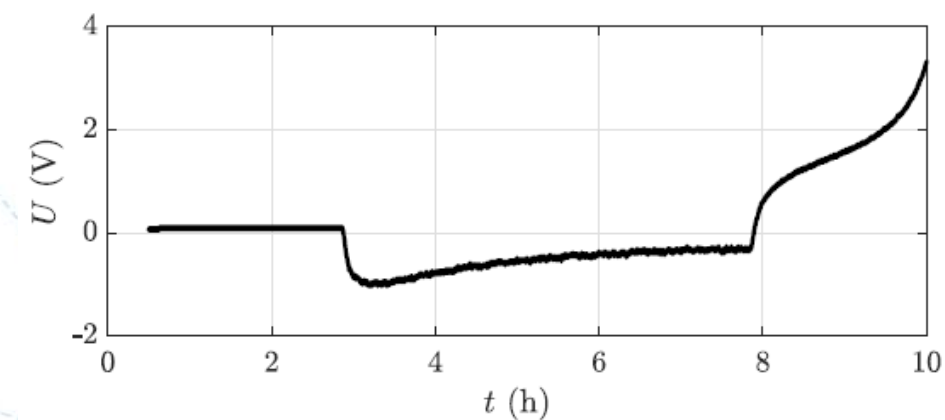
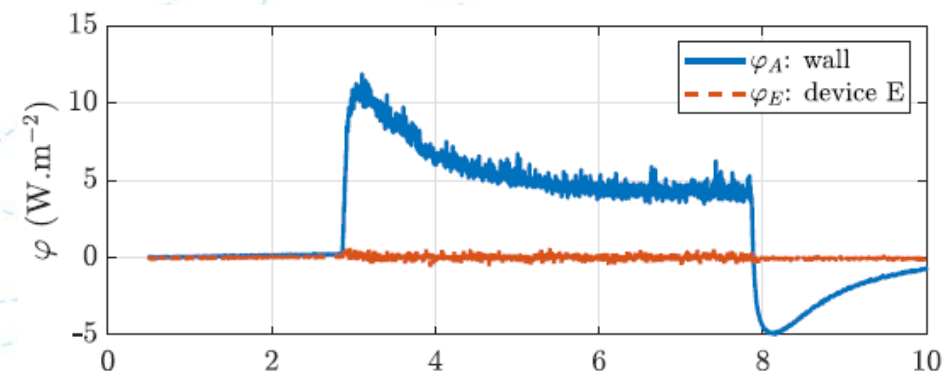
En pratique, on tracera le flux en fonction de la différence de température (pour la période de chauffage et de refroidissement)

OT: « Operative Temperature »
Méthode à flux nul



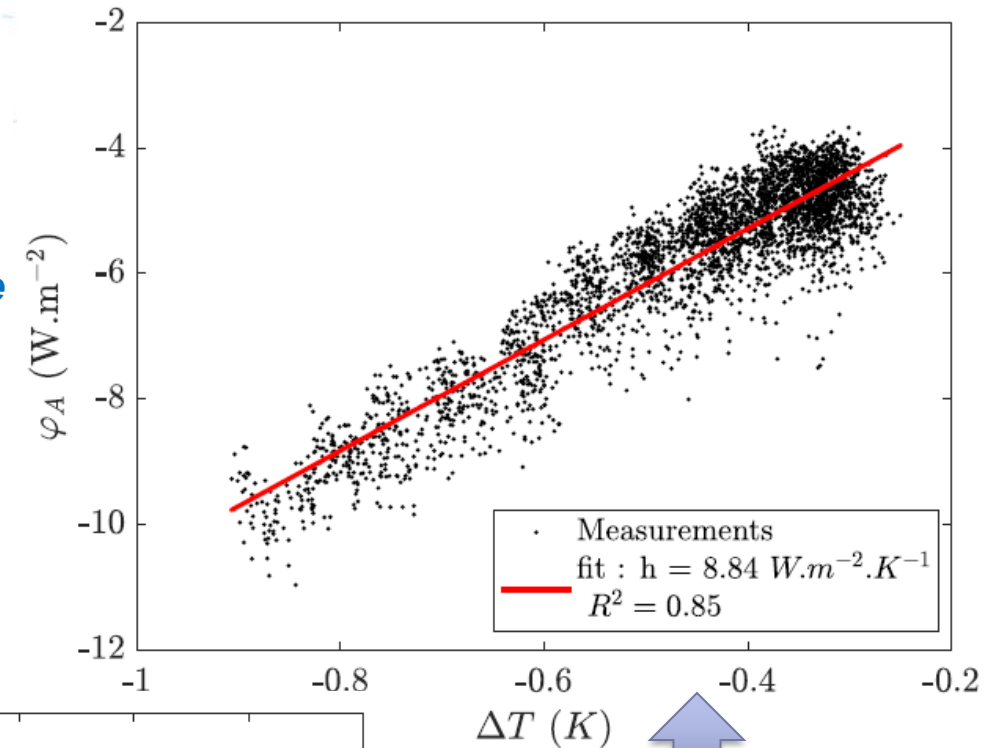
Méthodes testées – Méthode OT2

Flux mesurés

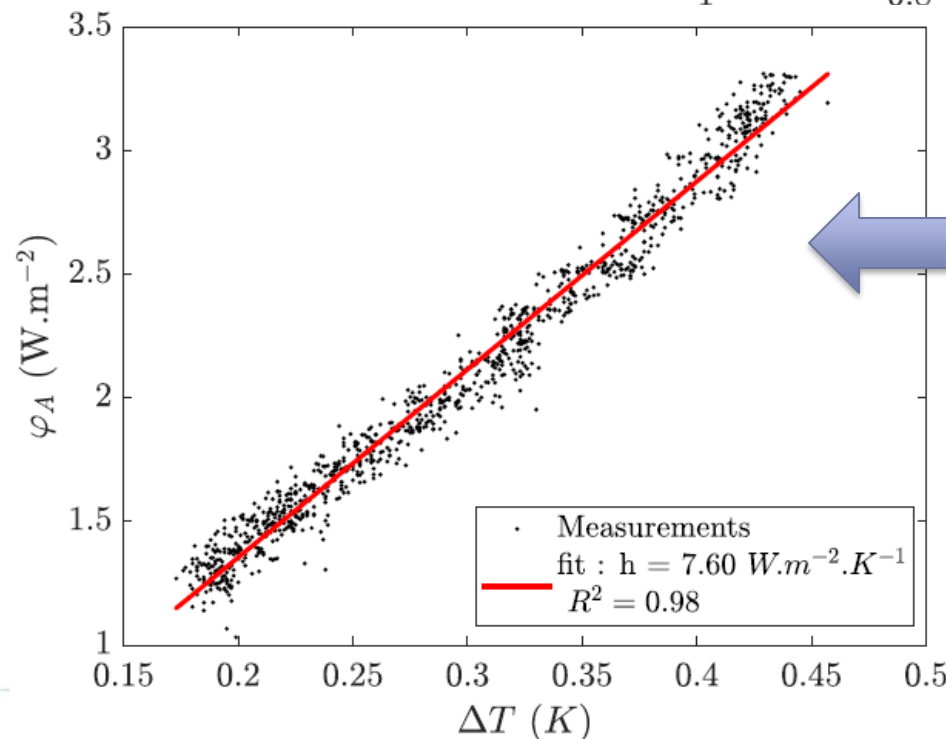


Tension de commande des modules à effet Peltier

Période de chauffage



Période de refroidissement



Détermination de h par régression linéaire

Méthodes testées – Méthode HE

HE: « Harmonic Excitation »

Alimentation des modules Peltier (TEC) en régime sinusoïdal

La température T_{op} peut être considérée comme constante sur une courte période, donc en régime sinusoïdal on peut écrire:

$$\tilde{\varphi} = h\tilde{T}$$

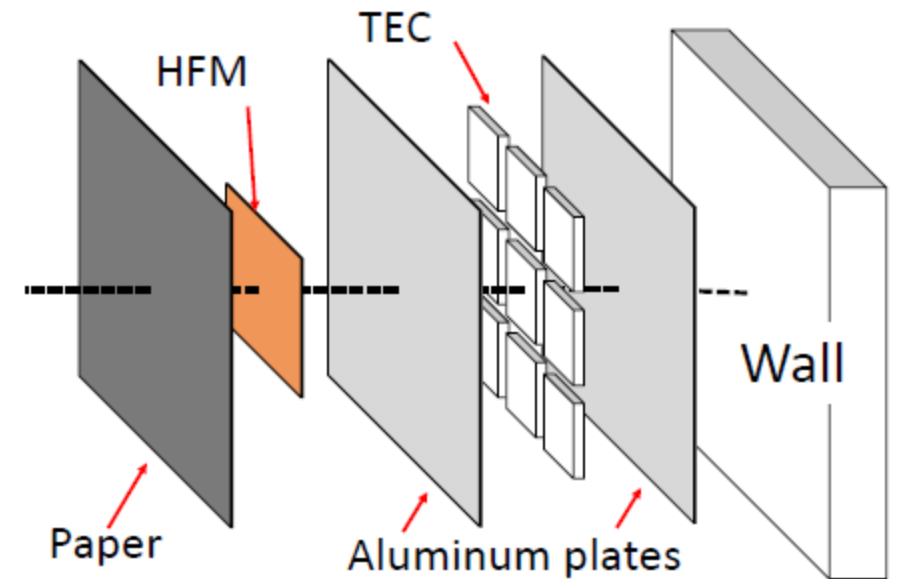
Détermination de h par détection synchrone ou Analyse de Fourier:

$$\hat{h} = \Re \left(\frac{\tilde{\varphi}}{\tilde{T}} \right) = \frac{A_{\varphi}}{A_T} \cos(\zeta)$$

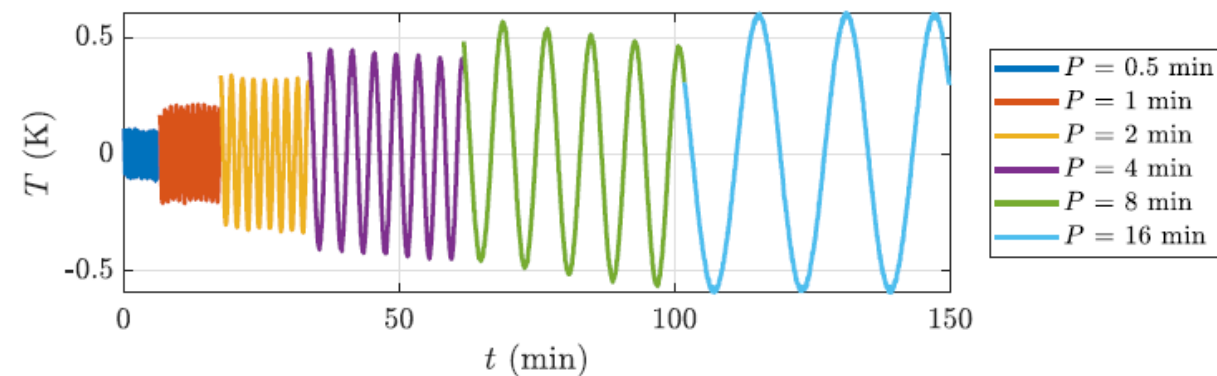
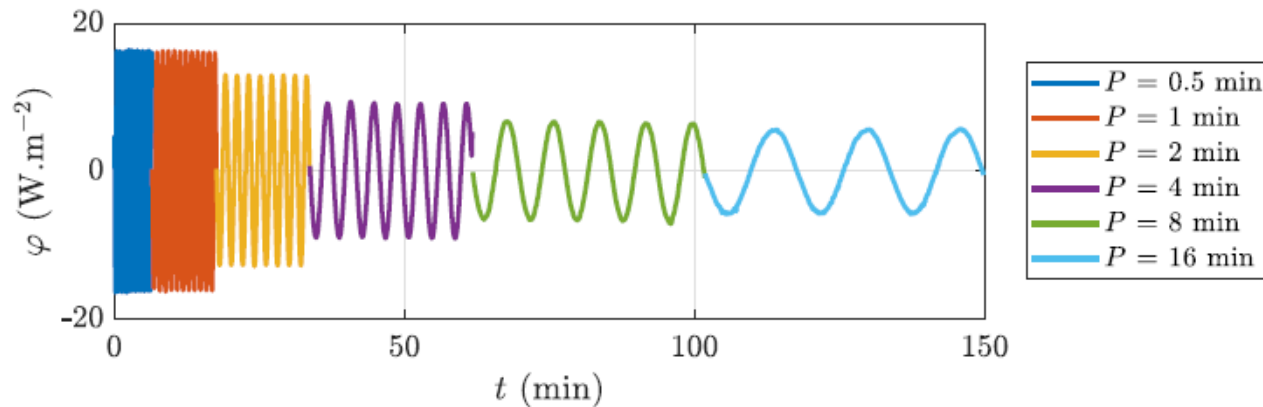
A_T : amplitude de T°

A_{φ} : amplitude densité de flux

ζ : déphasage

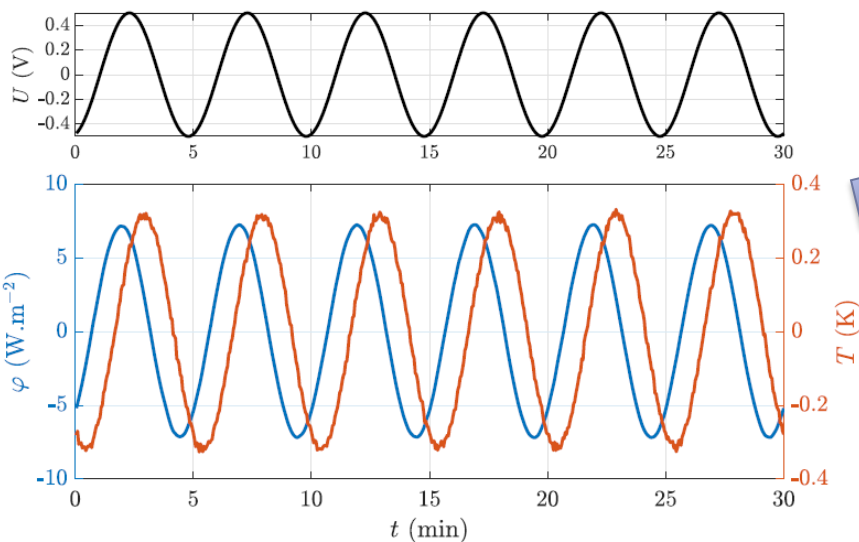
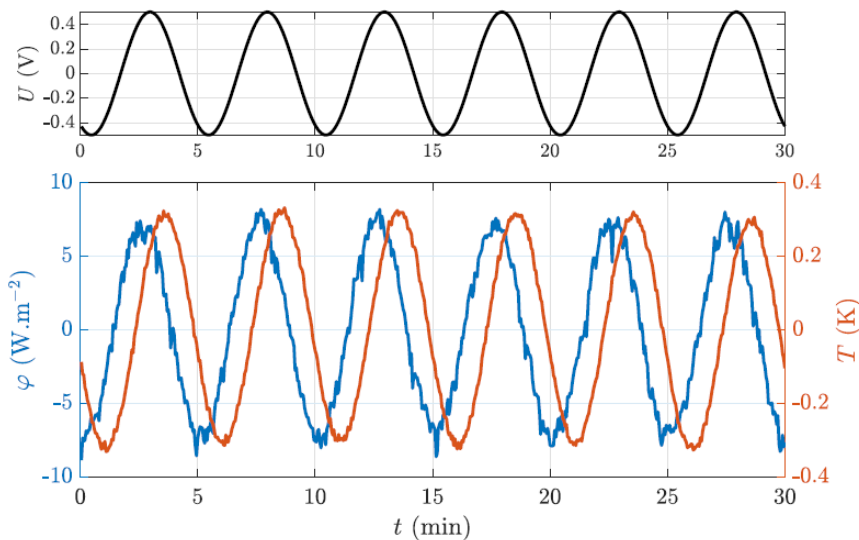


Dispositif identique à celui utilisé pour la méthode OT2

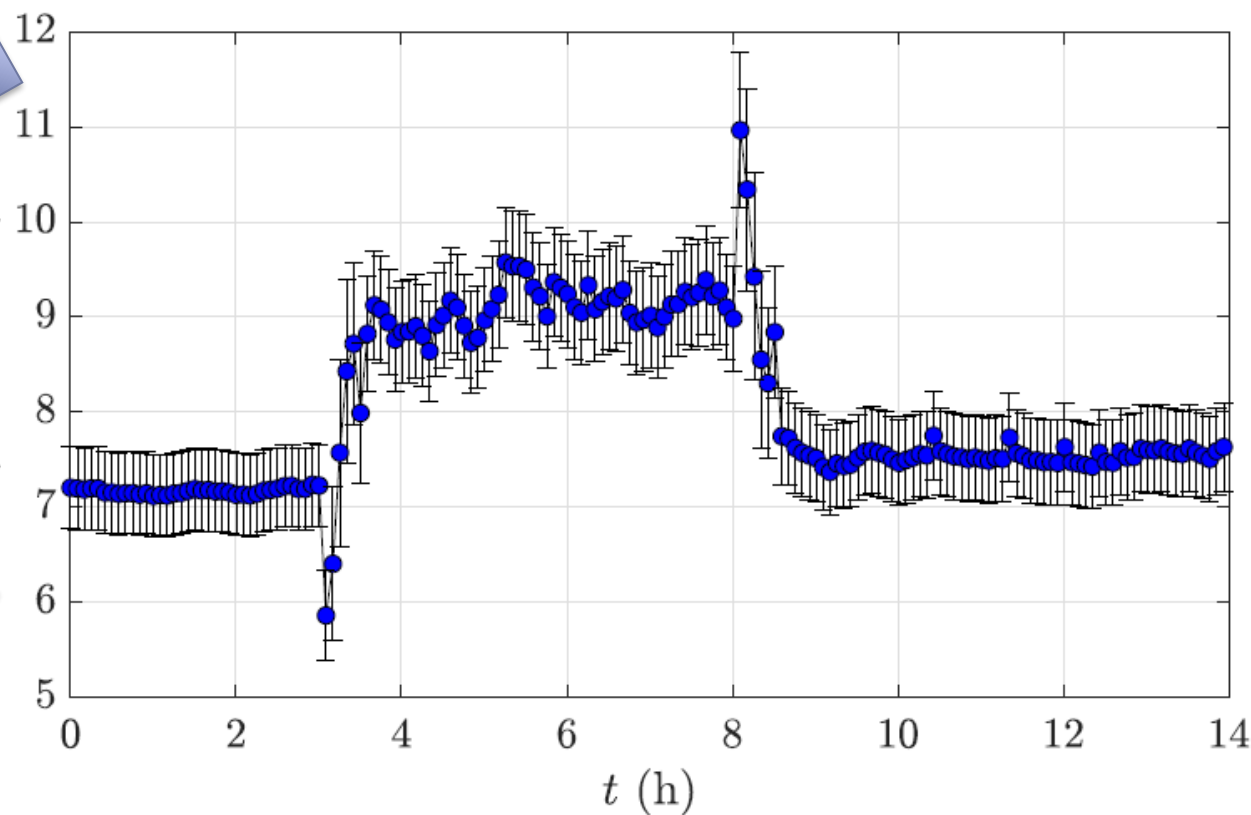


Méthodes testées – Méthode HE

Période de
chauffage



h (W.m⁻².K⁻¹)



Période de
refroidissement

Plan de l'exposé

Présentation générale

- Contexte des travaux et Motivations
- Hypothèses et principes généraux
- Panorama des méthodes de mesure retenues

Mise en œuvre des méthodes

- Dispositif expérimental
- Principes physiques
- Méthodes de calcul de h
- Exemples de résultat

Synthèse

- Résultats en régime permanent
- Résultats en régime transitoire
- Conclusions & Perspectives



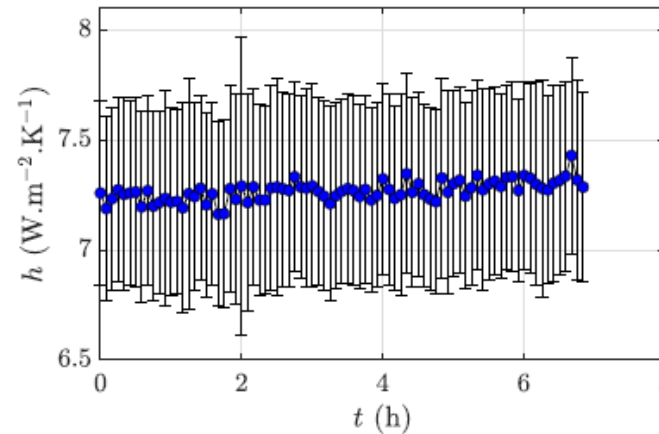
Résultats: régime stationnaire

Conditions de mesure: mois de juillet (T_{paroi} proche de 28°C), mesures en continu pendant 7 heures, pas de chauffage additionnel de la pièce

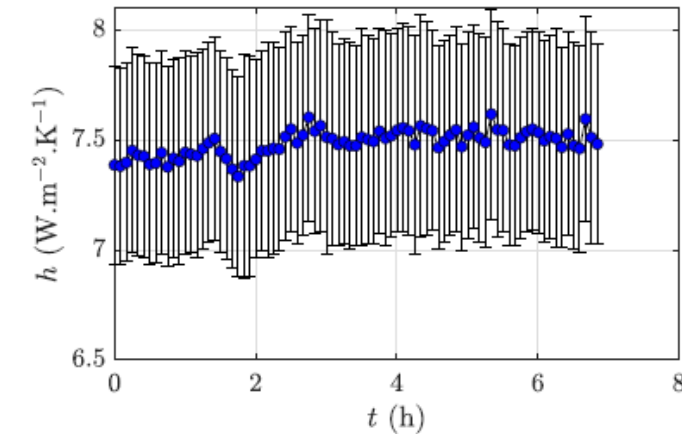
| Method | h ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) |
|--------|---|
| DM1 | 7.27 ± 0.41 |
| DM2 | not applicable |
| OT1 | 7.48 ± 0.45 |
| OT2 | 7.46 ± 0.45 |
| HE | 7.31 ± 0.44 |

Valeurs moyennes obtenues

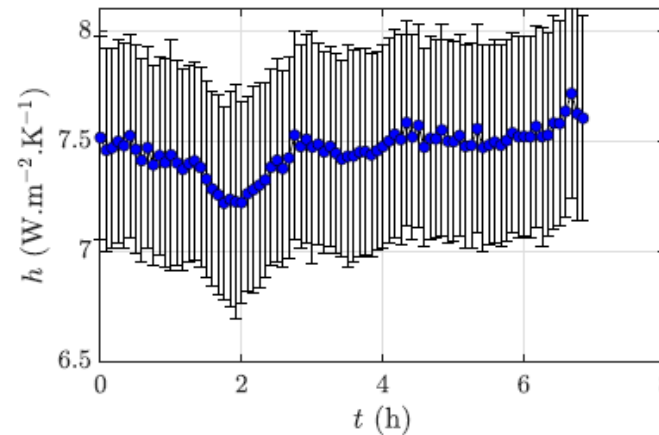
- Valeurs moyennes obtenues proches de la valeur “conventionnelle” de h pour une paroi plane verticale de bâtiment en intérieur [ISO 14683, 6946], soit $7.7 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
- Ecart maximum de $0.2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ entre les méthodes: valeur inférieure aux incertitudes de mesure.



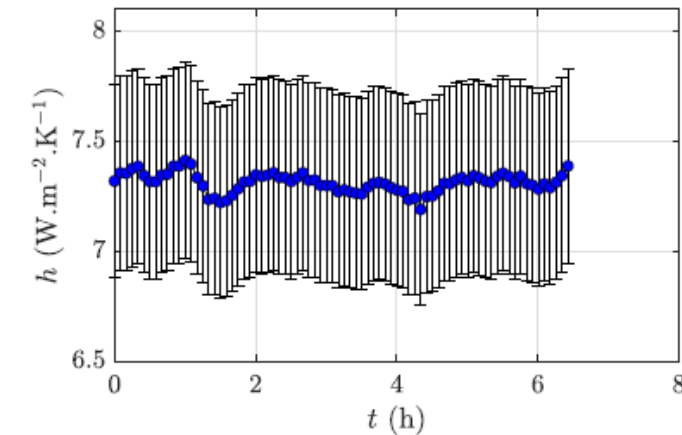
(a) DM1 method.



(b) OT1 method.



(c) OT2 method.



(d) HE method.

Résultats: régime transitoire

Estimation des valeurs attendues

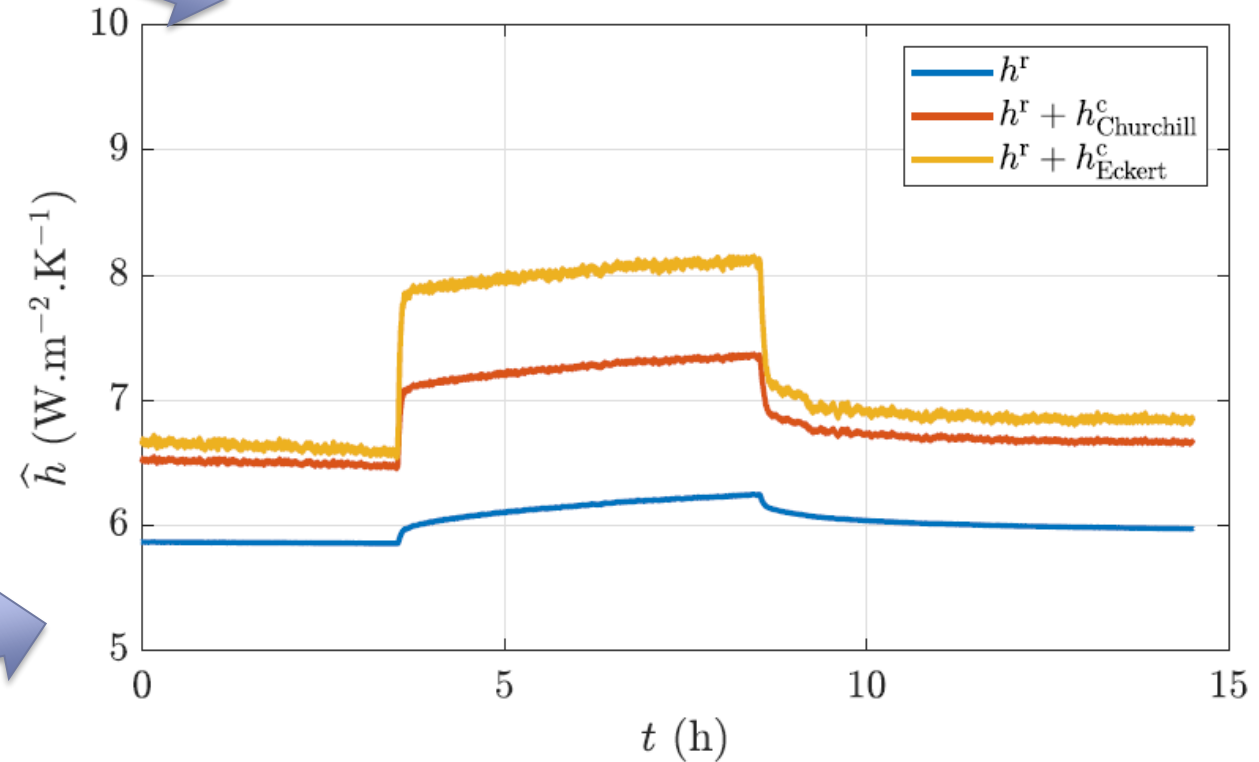
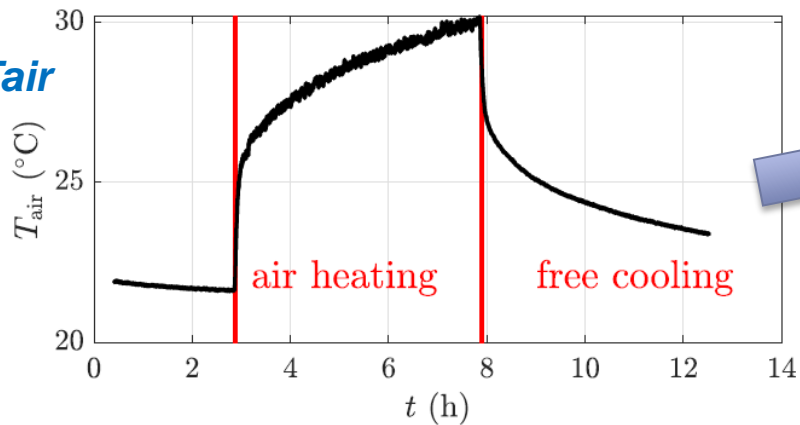
Part radiative: linéarisation des échanges $h^r = 4\varepsilon\sigma T_m$

Part convective: $h^c = Nu_x \times \frac{\lambda}{x}$

+ utilisation de deux corrélations

- Eckert: $Nu_x = 0.0295 \frac{Pr^{1/15}}{(1 + 0.494Pr^{2/3})^{2/5}} Ra_x^{2/5}$
- Churchill: $Nu_x = 0.68 + \frac{3}{4} \times 0.515 \times Ra_x^{1/4}$

Variation de T_{air}



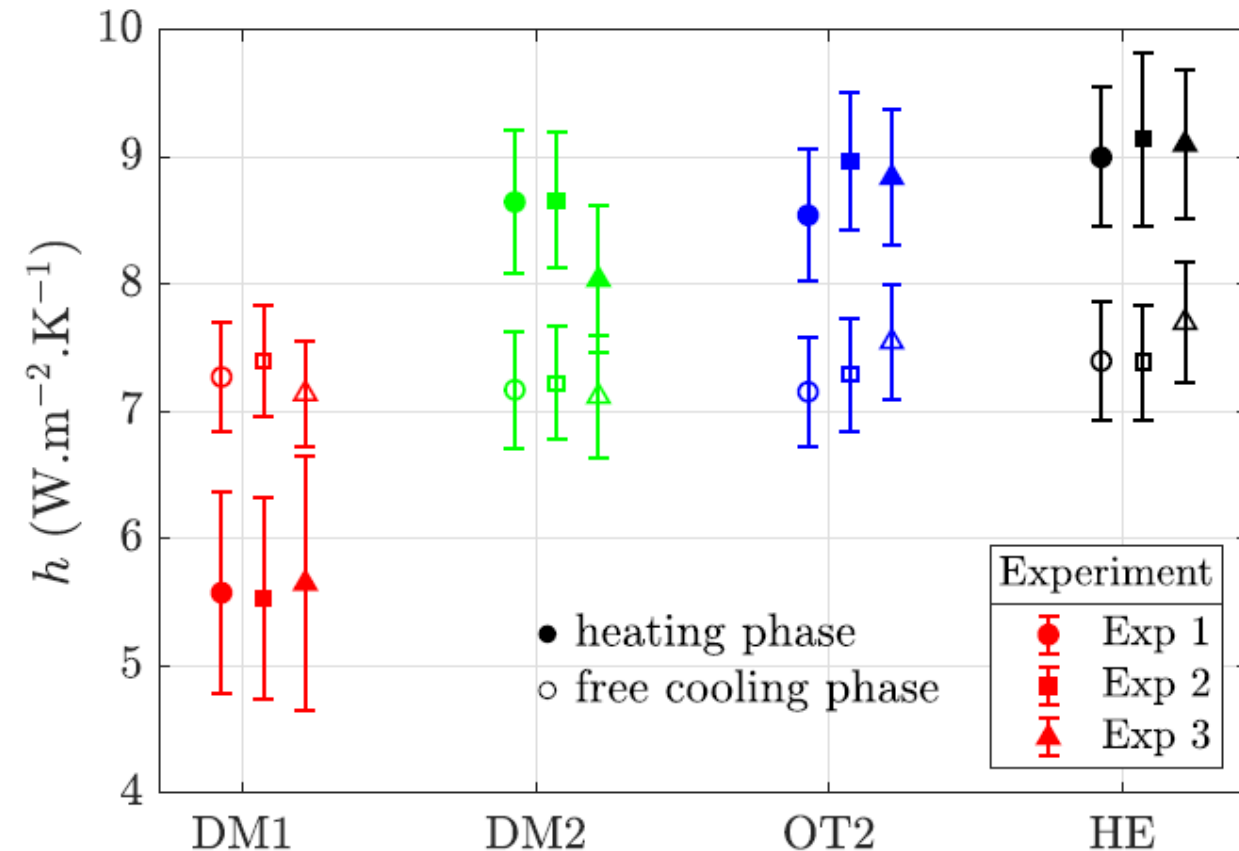
Résultats: régime transitoire

Comparaison des résultats

| | | DM 1 | DM 2 | OT 2 | HE |
|---------------------|-------|----------------|---------------|---------------|---------------|
| Heating period | Exp 1 | 5.6 ± 0.8 | 8.6 ± 0.6 | 8.5 ± 0.5 | 9.0 ± 0.5 |
| | Exp 2 | 5.5 ± 0.8 | 8.6 ± 0.5 | 9.0 ± 0.5 | 9.1 ± 0.7 |
| | Exp 3 | 5.6 ± 1.0 | 8.6 ± 0.6 | 8.8 ± 0.5 | 9.1 ± 0.6 |
| Free cooling period | Exp 1 | 7.3 ± 0.4 | 7.2 ± 0.5 | 7.2 ± 0.4 | 7.4 ± 0.5 |
| | Exp 2 | 7.4 ± 0.4 | 7.2 ± 0.4 | 7.3 ± 0.4 | 7.4 ± 0.4 |
| | Exp 3 | 7.1 ± 0.42 | 7.1 ± 0.5 | 7.5 ± 0.5 | 7.7 ± 0.5 |

Valeurs de h obtenues (en $W.m^{-2}.K^{-1}$)

- Incertitudes plus faibles en phase de refroidissement (meilleur rapport S/B)
- Valeurs équivalentes pour les différentes méthodes
- Exception: méthode DM1 non adaptée au cas de la mesure pendant la phase de chauffage



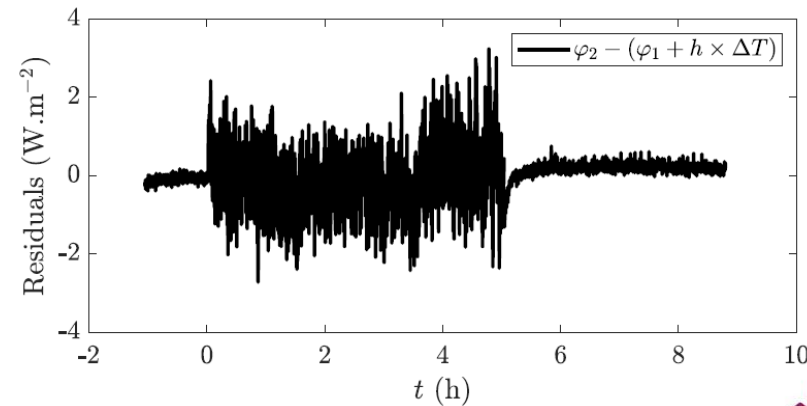
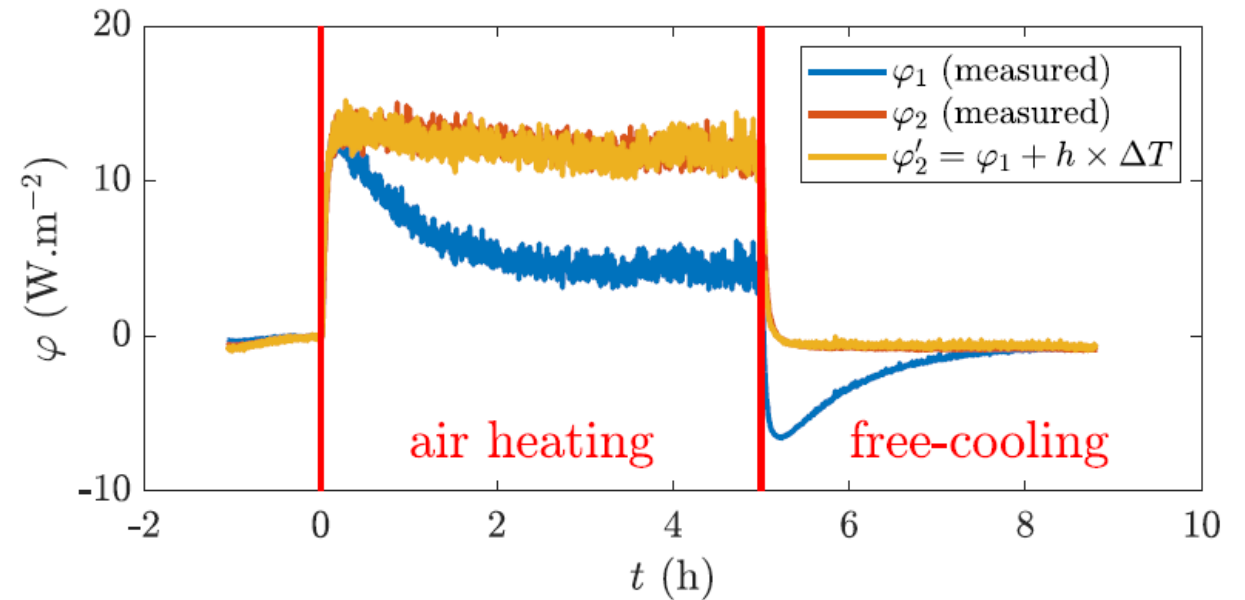
Conclusion

Applicabilité des méthodes proposées (étudiées)

| Method | Applicable in: | |
|--------|----------------|-----------------------------|
| | Steady-state | Transient state |
| DM1 | Yes | Yes but under-estimation |
| DM2 | Not always | Yes |
| OT1 | Yes | No |
| OT2 | Yes | Yes |
| HE | Yes | Yes |

*Limitation liée aux tests effectués:
mesure en intérieur, émissivité élevée
de la surface de la paroi*

Possibilité d'utilisation pour cartographie en flux d'une paroi



Perspectives

Test des méthodes en extérieur:

- Augmentation de la part de la convection
- Protection vis-à-vis du rayonnement solaire

Possibilité de distinction entre parts convective et radiative?

- Utilisation de différents dispositifs avec des revêtements de surface de propriétés différentes
- Exemple: revêtement à faible émissivité (identification de la part convective uniquement)
- Méthode envisagée: HE



Questions?

Pour plus d'informations:

Thèse Adrien François, Université Paris-Est, Estimation of the thermal performance of building walls and thermal bridges using active infrared thermography and inverse techniques

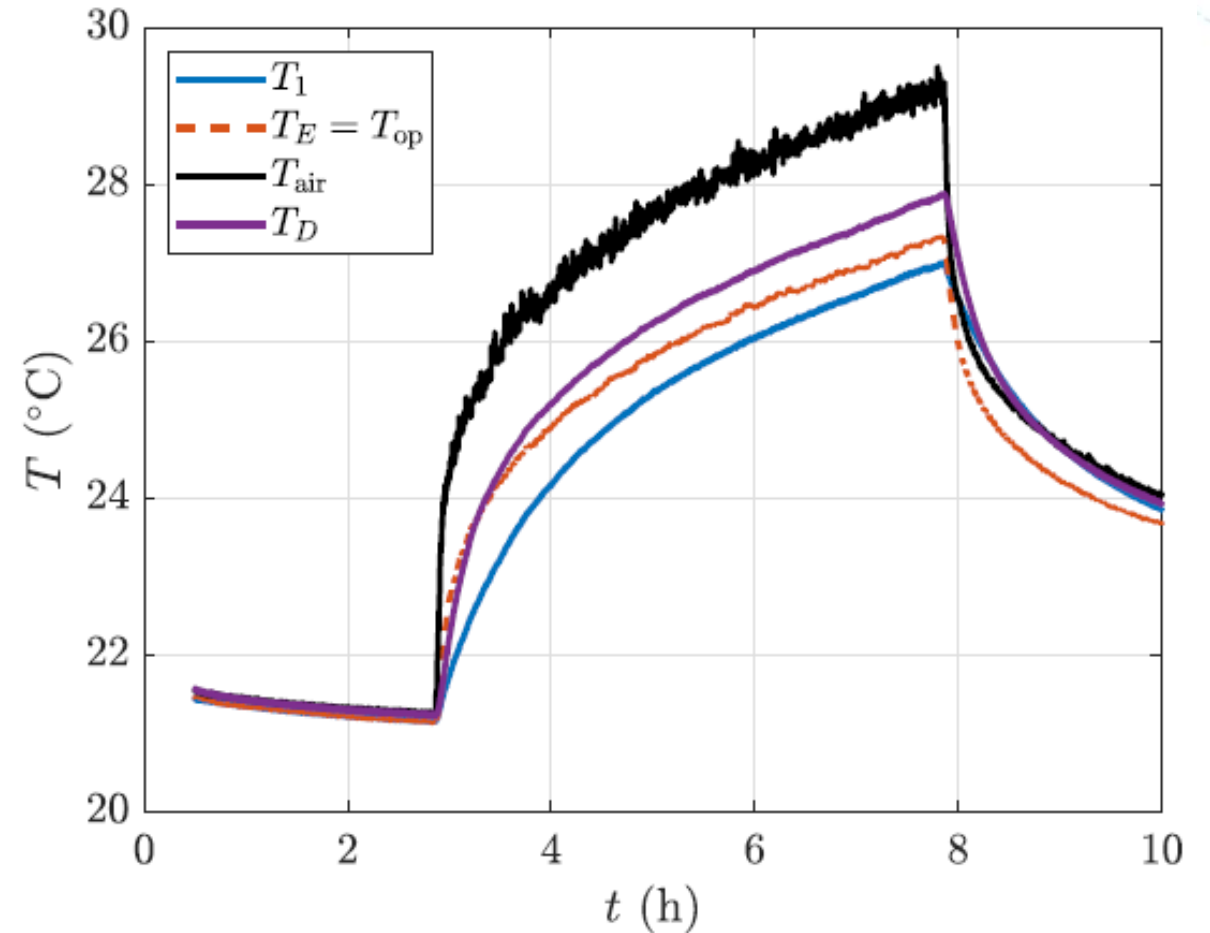
*A. François, L. Ibos, V. Feuillet, J. Meulemans, In situ measurement of the heat transfer coefficient on a building wall surface: h-measurement device based on a harmonic excitation, *Entropie, Numéro 4 spécial SFT Prix Biot-Fourier, Vol. 1, 110633 (11 pages) (2020);**
<https://doi.org/10.21494/ISTE.OP.2020.0547>

*A. François, L. Ibos, V. Feuillet, J. Meulemans, In situ measurement method for the quantification of the thermal transmittance of a non-homogeneous wall or a thermal bridge using an inverse technique and active infrared thermography, *Energy & Buildings, Vol. 233, 110633 (18 pages) (2021);** <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110633>



Evolution T_{op} en régime transitoire

Hypothèse $T_{op} = T_{air}$ non valide en régime transitoire car la température d'environnement (des parois) varie moins vite que la température d'air




Evaluation d'incertitudes

Combinaison Type A et Type B

$$u = \sqrt{u_{\text{type-A}}^2 + u_{\text{type-B}}^2}$$

Pour méthodes DM2 et OT2: régression linéaire


$$Y = h \times X + b$$



$$u(h) = \frac{1}{\sqrt{N}} \frac{\sqrt{u^2(Y) + h^2 u^2(X)}}{\text{Var}(X)}$$

Pour méthode HE:

$$u(h) = \frac{1}{A_T} \sqrt{u^2(A_\varphi) + \left(\frac{A_\varphi}{A_T}\right)^2 u^2(A_T)}$$



$$\begin{cases} A_T = |FT_T(k_j)| \\ u^2(A_T) = \text{Var}(FT_T(k_j))|_{k \neq k_j} \end{cases}$$

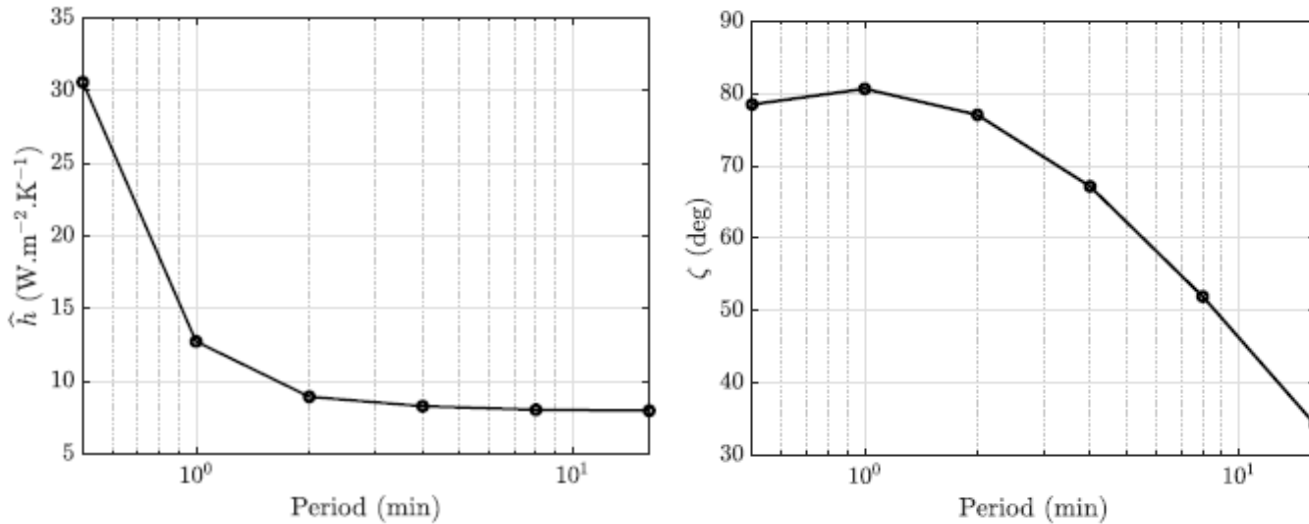
Type B:

$$u(\alpha) = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \beta_i} u(\beta_i) \right)^2}$$

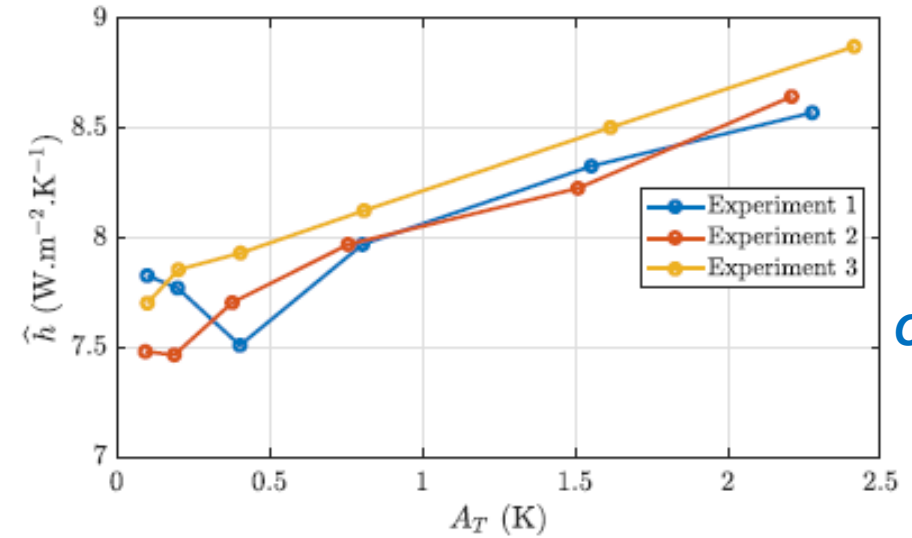
Méthode HE

Influence de la fréquence des oscillations: biais important aux fréquences les plus élevées (inertie des matériaux en surface)

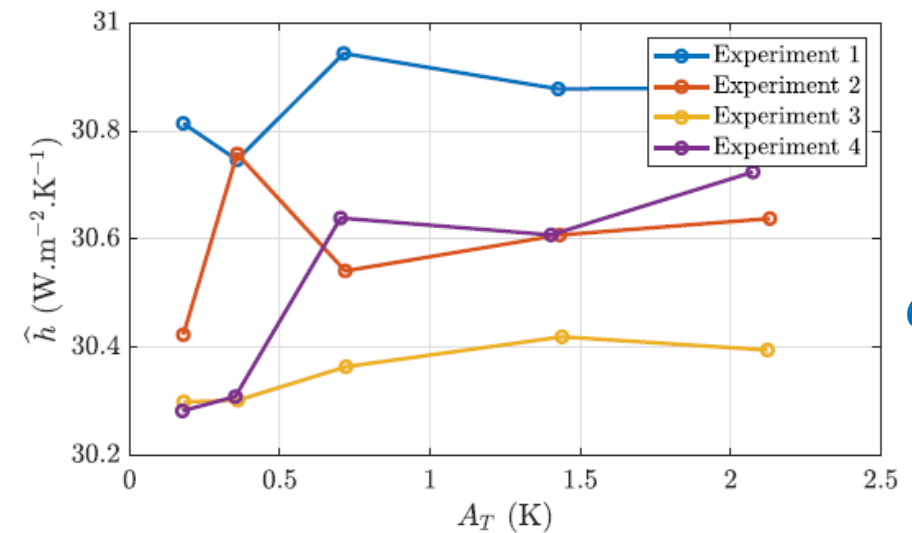
=> Choix d'une période de 5 minutes



Influence de l'amplitude des oscillations sur les résultats
Valeur retenue = 0.3K (< 0.5K)



Convection naturelle



Convection forcée

