

Bordeaux Institute of mechanics and engineering



Méthode innovante pour l'évaluation
non destructive des performances
thermiques de parois de bâtiments.

YingYing YANG, Ting Ting VOGT WU, Alain SEMPEY, Jean
DUMOULIN*, Jean-Christophe BATSALE



* LUNAM University, IFSTTAR-CoSys, SII, INRIA/ IRISA

Objectifs de l'étude

→ Etude réalisée dans le cadre du projet H2020 BUIL2SPEC



› Concevoir une plateforme d'aide à l'autocontrôle en phase chantier

→ Evaluation in-situ

- › Rapide : régime transitoire
- › Peu ou pas intrusif/destructif
- › Dispositif peu encombrant

→ Evaluation en phase chantier :

- › Locaux non chauffés : sollicitation de la paroi
 - Sollicitation passive : soleil
 - Sollicitation active : source artificielle

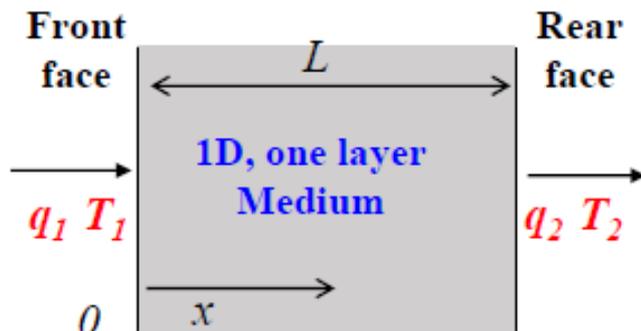
Bases théoriques : le formalisme des quadripôles

- Relation matricielle entre les températures et les flux de chaleur aux surfaces

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t}$$

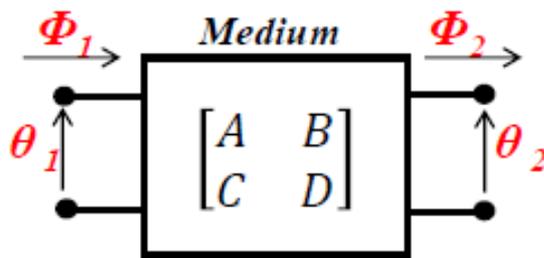
($T = T_0$ for $t = 0$)

$$q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$



Laplace transform

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$



$$A = D = \cosh(L\sqrt{p/\alpha})$$

$$B = \frac{1}{\lambda\sqrt{p/\alpha}} \sinh(L\sqrt{p/\alpha})$$

$$C = \lambda\sqrt{p/\alpha} \sinh(L\sqrt{p/\alpha})$$

- Hypothèse : milieu semi-infini

$$\Phi_2 = 0$$

$$\theta_1 = \frac{A}{C} \Phi_1$$

Soit $T_1 = g \cdot q_1$ avec

$$g = L^{-1} \left(\frac{1}{b\sqrt{p}} \right)$$

Bases théoriques : le formalisme des quadripôles

→ Choix de la sollicitation :

› Une impulsion : méthode flash de laboratoire

$$g_{pulse} = \mathcal{L}^{-1} \left(\frac{1}{b\sqrt{p}} \right) = \frac{1}{b\sqrt{\pi t}} \quad (\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{J})$$

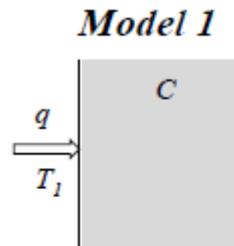
› Un échelon

$$g_{step} = \frac{T_1}{q} = \frac{2\sqrt{t}}{b\sqrt{\pi}} \quad (\text{K} \cdot \text{m}^2/\text{W})$$

→ Pour une paroi multicouche :

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdots \begin{bmatrix} A_n & B_n \\ C_n & D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{eq} & B_{eq} \\ C_{eq} & D_{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix} = M_{eq} \begin{bmatrix} \theta_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

Bases théoriques : exemple d'application

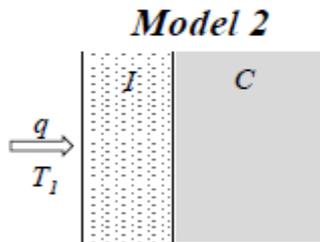


$$\theta_1 = \frac{A}{C} \Phi_1 = \frac{1}{b\sqrt{p} \tanh(L\sqrt{p}/\alpha)} \Phi_1$$

$$L \rightarrow \infty, \theta_1 = \frac{1}{b\sqrt{p}} \Phi_1$$



$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z \cdot \Phi_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}, z = \frac{1}{b\sqrt{p}}$$



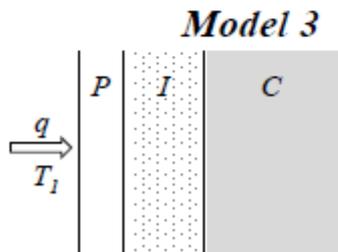
Exact expression

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_I & B_I \\ C_I & D_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \cdot \Phi_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

Simplified expression

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \cdot \Phi_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = (z + R) \cdot \Phi_1$$

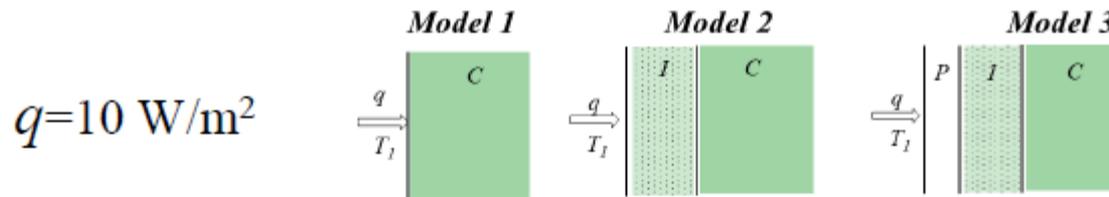


$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_P & B_P \\ C_P & D_P \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_I & B_I \\ C_I & D_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \cdot \Phi_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

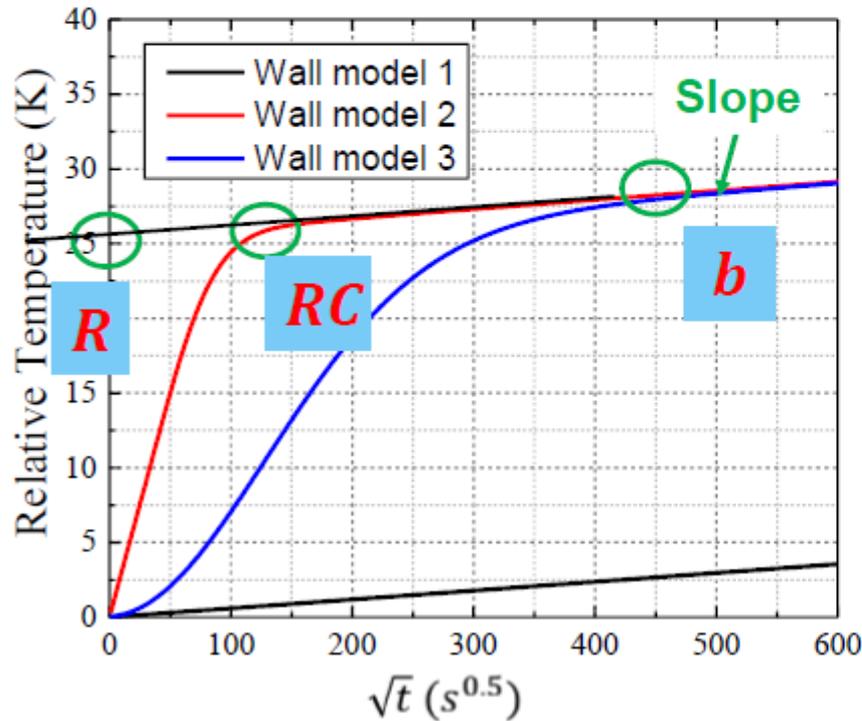
$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \Phi_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ C \cdot p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z \cdot \Phi_2 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = \frac{z + R}{1 + C_2 \cdot p \cdot (z + R)} \cdot \Phi_1$$

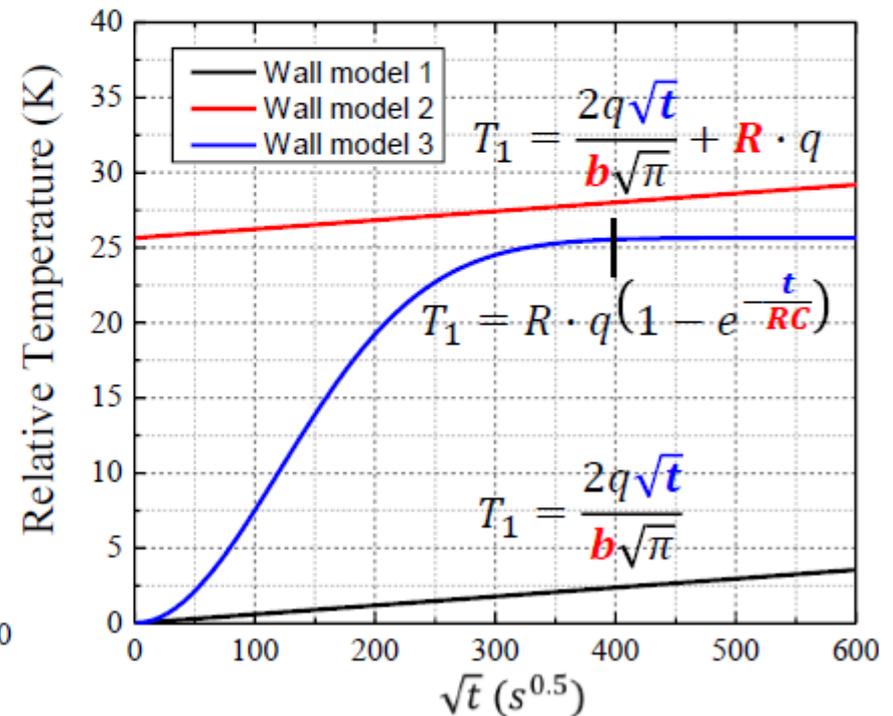
Bases théoriques : exemple d'application



Exact step response



Simplified step response



Bases théoriques : application à des données mesurées

→ La sollicitation réelle ne sera ni une impulsion, ni un échelon

› Théorème de Duhamel :

$$T_1(t) = g_{pulse}(t) * q_1(t) = \int_0^t g_{pulse}(t - \tau) q_1(\tau) d\tau = \int_0^t q_1(t - \tau) g_{pulse}(\tau) d\tau$$

Et $g_{step}(t) = \int_0^t g_{pulse}(\tau) d\tau$

↓ Approximation

$$g_{pulse} = (M^t M)^{-1} M^t \cdot T$$

$$SVD(M) = U \cdot W \cdot V^t;$$

↓ Truncated SVD

$$\begin{matrix} T_1^1 \\ T_1^2 \\ T_1^3 \\ \vdots \\ T_1^n \end{matrix} = \begin{matrix} q_1^1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ q_1^2 & q_1^1 & 0 & 0 & 0 \\ q_1^3 & q_1^2 & q_1^1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ q_1^n & \dots & q_1^3 & q_1^2 & q_1^1 \end{matrix} \begin{matrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ \vdots \\ g_n \end{matrix}$$

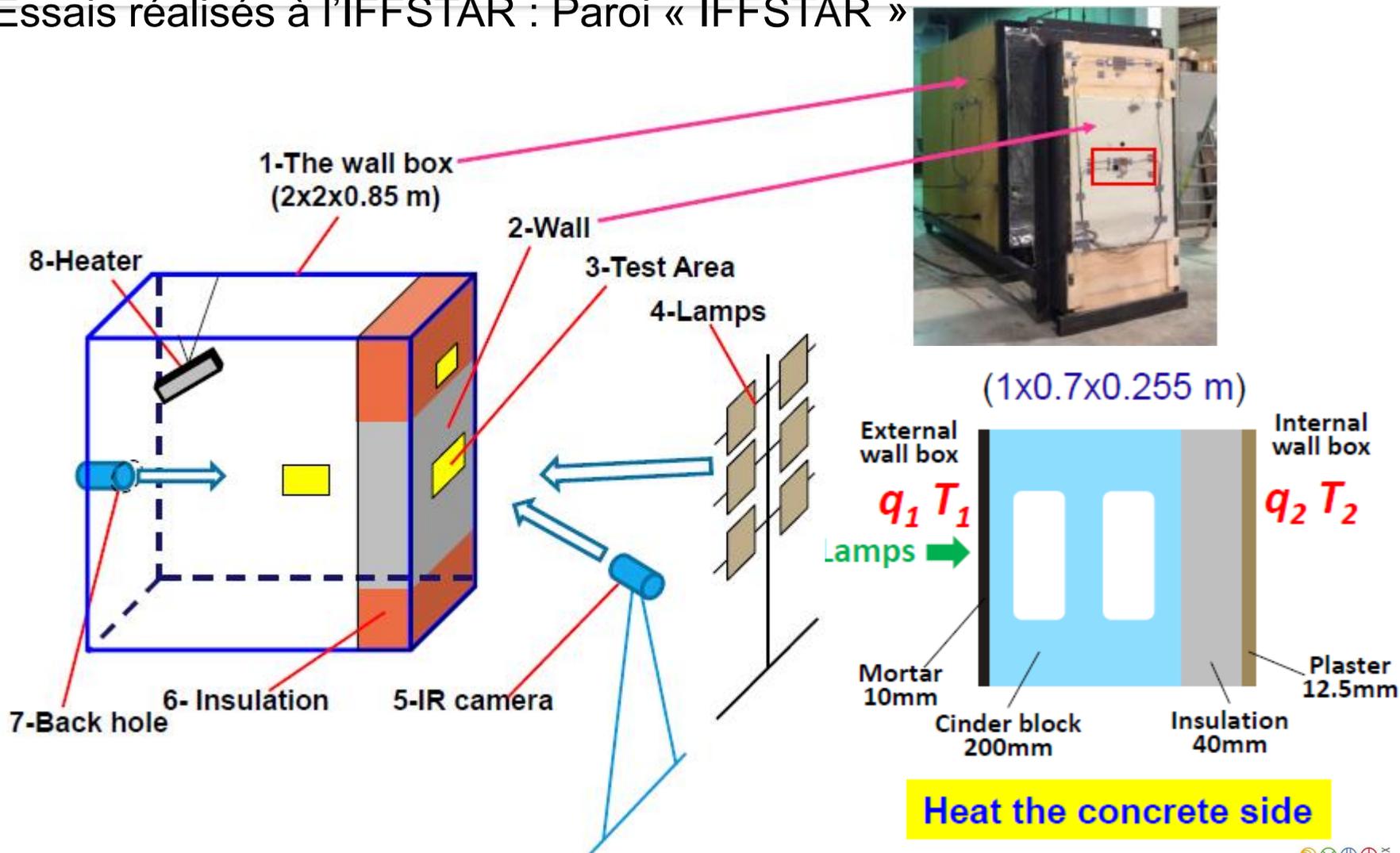
$\begin{matrix} T & & M & & g \end{matrix}$



$$\hat{g}_{k\ pulse}^{TSVD} = V_{n \cdot k} \cdot W_{k \cdot k}^{-1} \cdot U_{n \cdot k}^t \cdot T$$

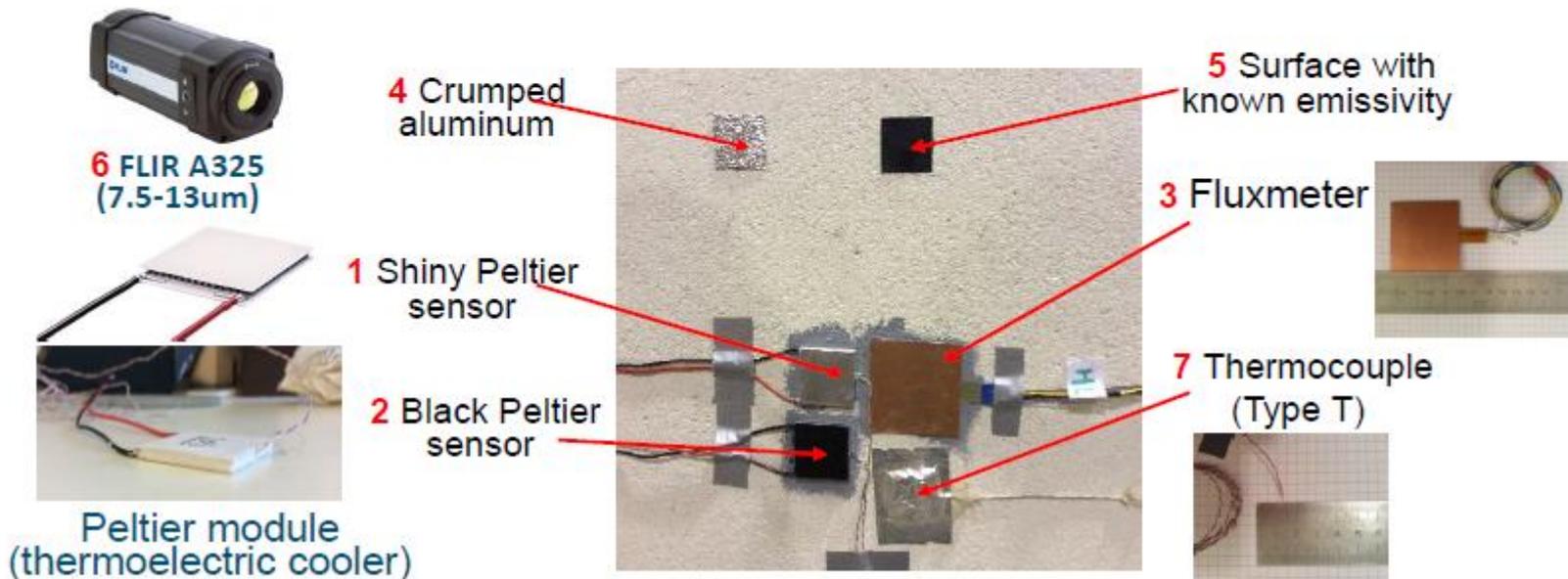
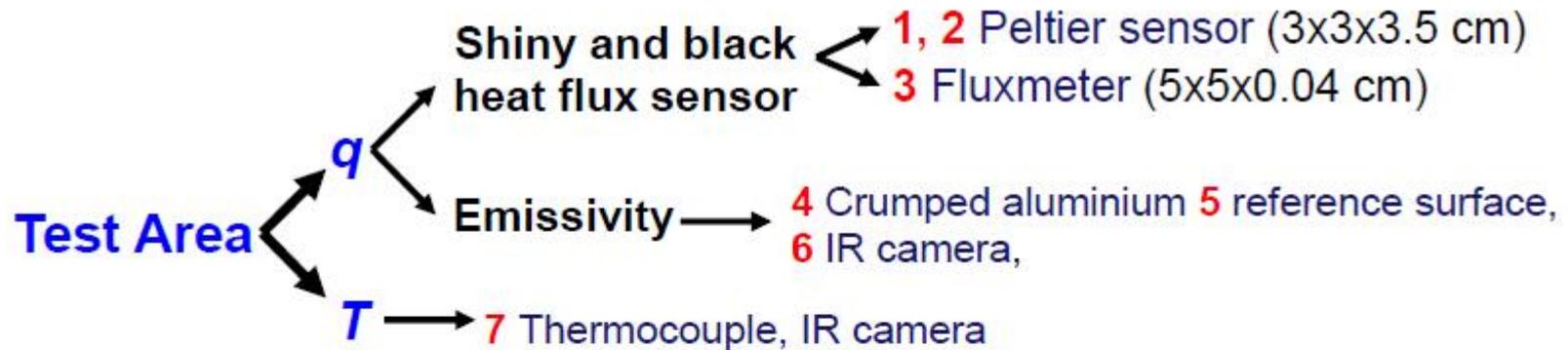
Essais expérimentaux :

→ Essais réalisés à l'IFFSTAR : Paroi « IFFSTAR »



Essais expérimentaux :

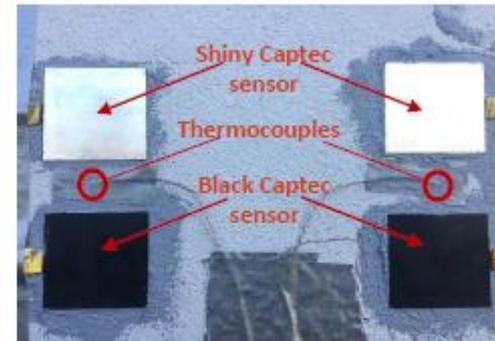
→ Essais réalisés à l'IFFSTAR : Paroi « IFFSTAR »



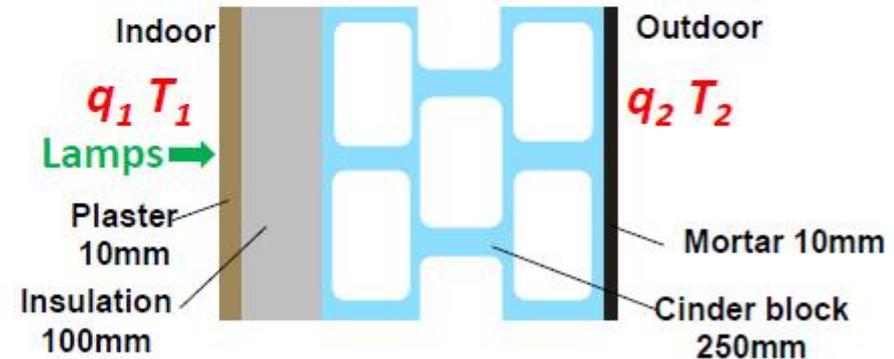
Essais expérimentaux

- Essais réalisés à l'IUT de Bordeaux, département Génie Civil – construction Durable : Paroi « IUT »

Indoor



Outdoor



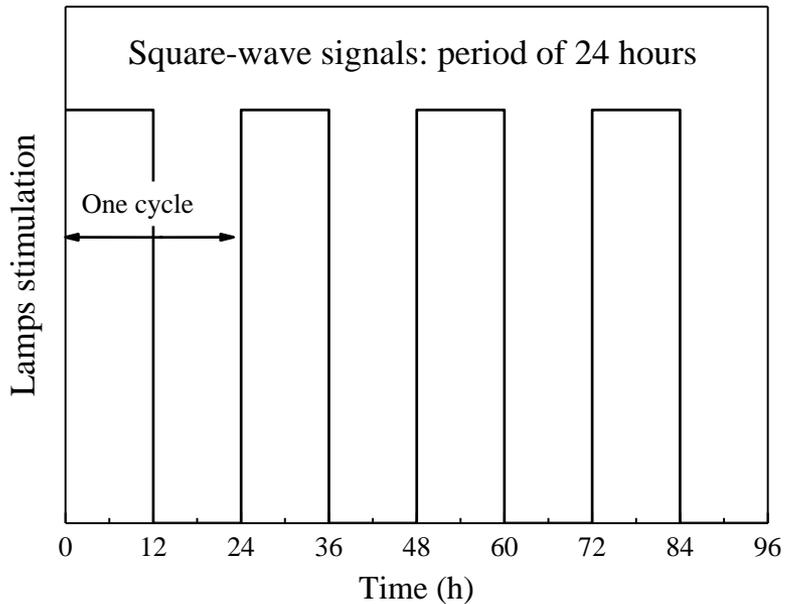
Heat the insulation side

Essais expérimentaux

→ Les sollicitations

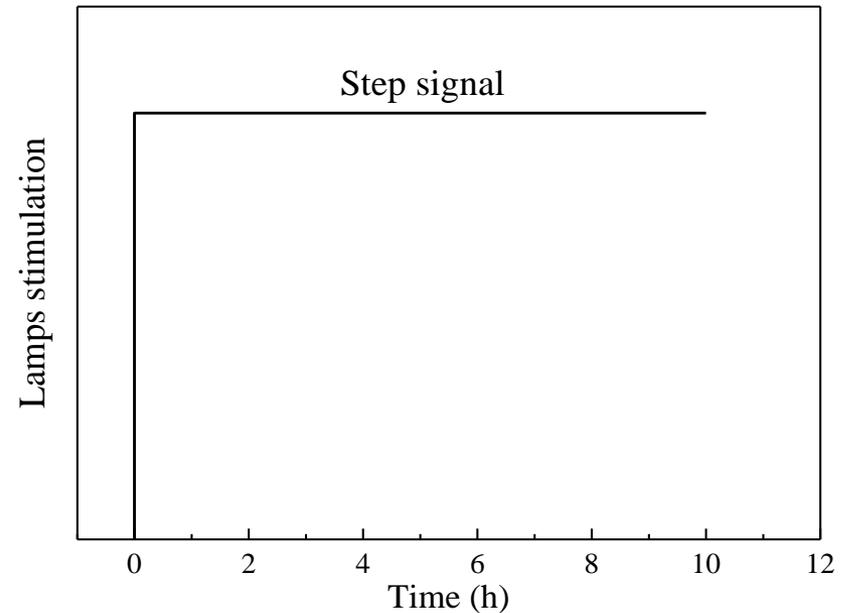
› Paroi IFFSTAR

- Régime permanent
- Sollicitations périodiques(24h, 48h, 96h, 2h)



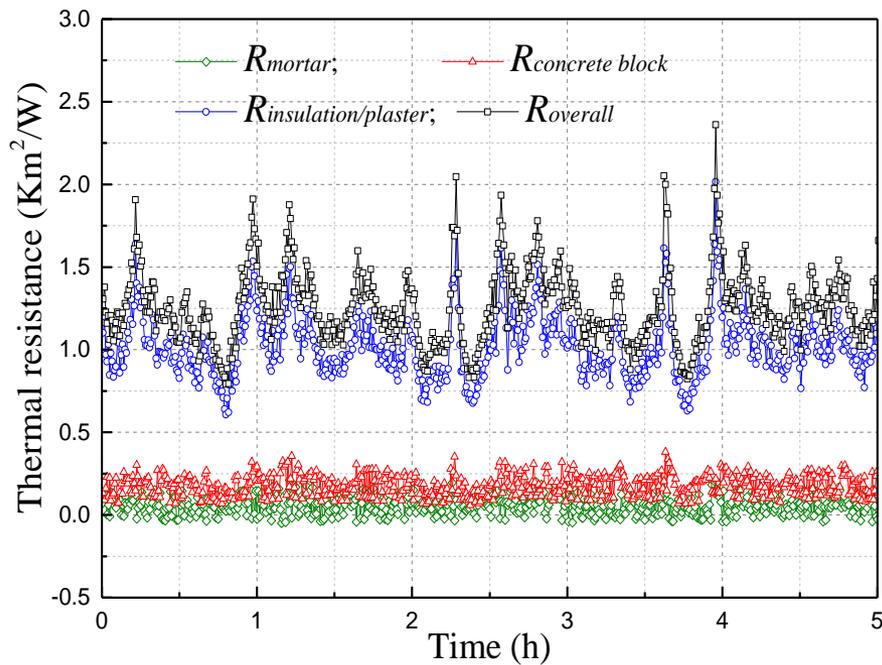
› Paroi IUT

- Un échelon



Résultats : paroi IFFSTAR

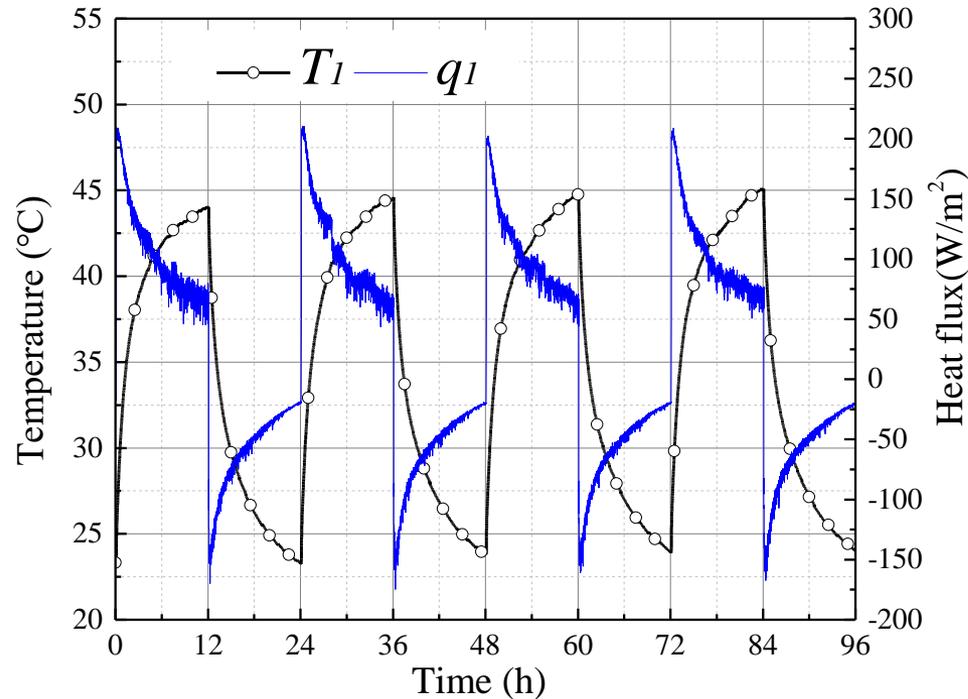
→ Réponse en régime permanent : $R = \Delta T / q$



Layers	R_{ref} (K · m ² /W)	R_{exp} (K · m ² /W)	Relative errors to R_{ref}
Mortar	0.009	0.065 ± 92%	622.2%
Concrete block	0.23	0.19 ± 36%	-17.4%
Insulate-plaster	1.10	1.09 ± 18%	1.0%
Overall (4 layers)	1.34	1.35 ± 16%	0.8%

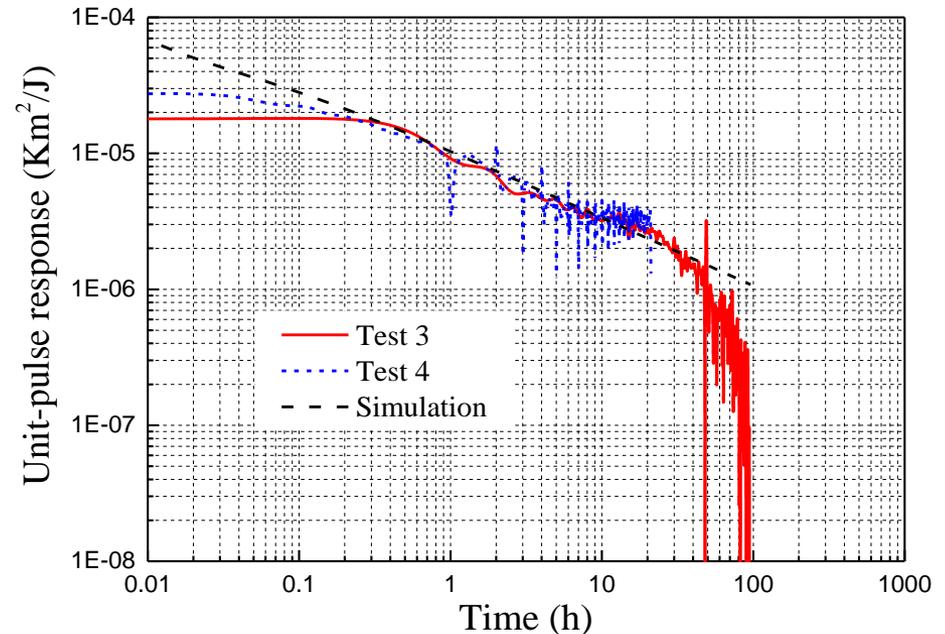
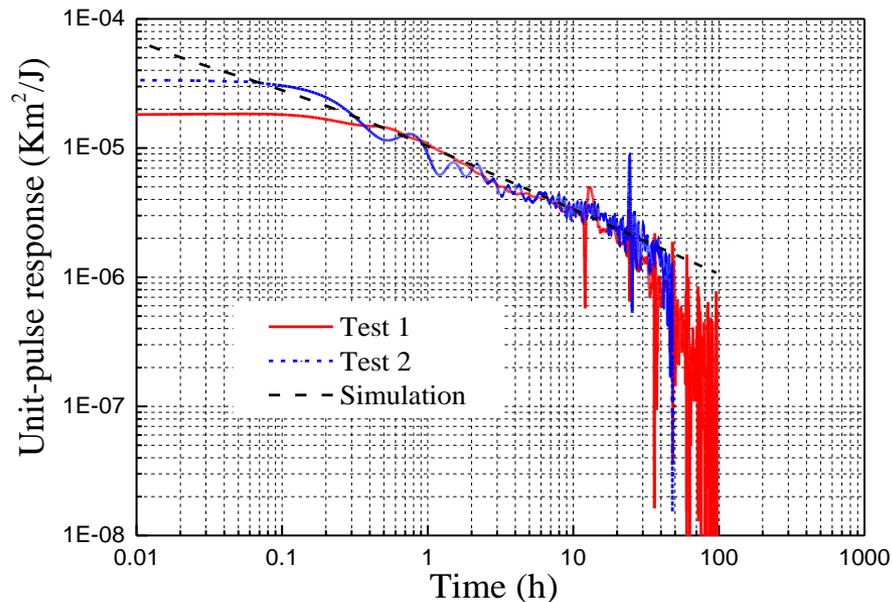
Résultats : paroi IFFSTAR

→ Mesures en régime instationnaire



› Impact des échanges superficiels (convection et rayonnement)

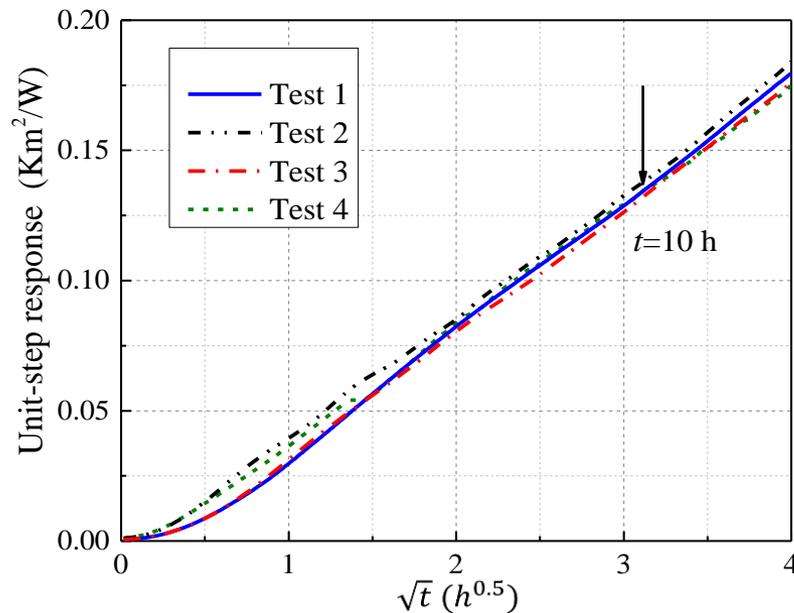
→ Réponse impulsionnelle



- › Ecart aux temps courts : mauvaise précision des mesures de flux ou effets inertiels
- › Ecart aux temps longs : influence du bruit de mesure + hypothèse de milieu semi-infini en défaut.

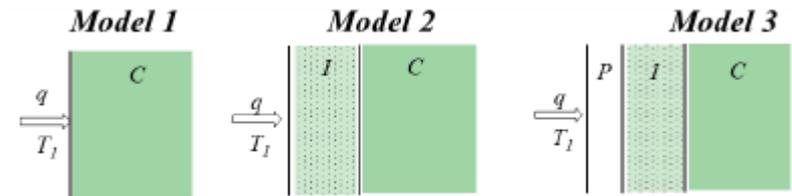
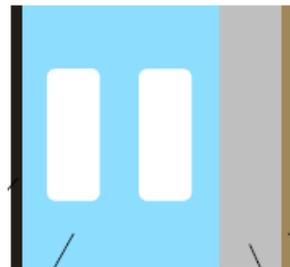
Résultats : paroi IFFSTAR

→ Réponse à un échelon

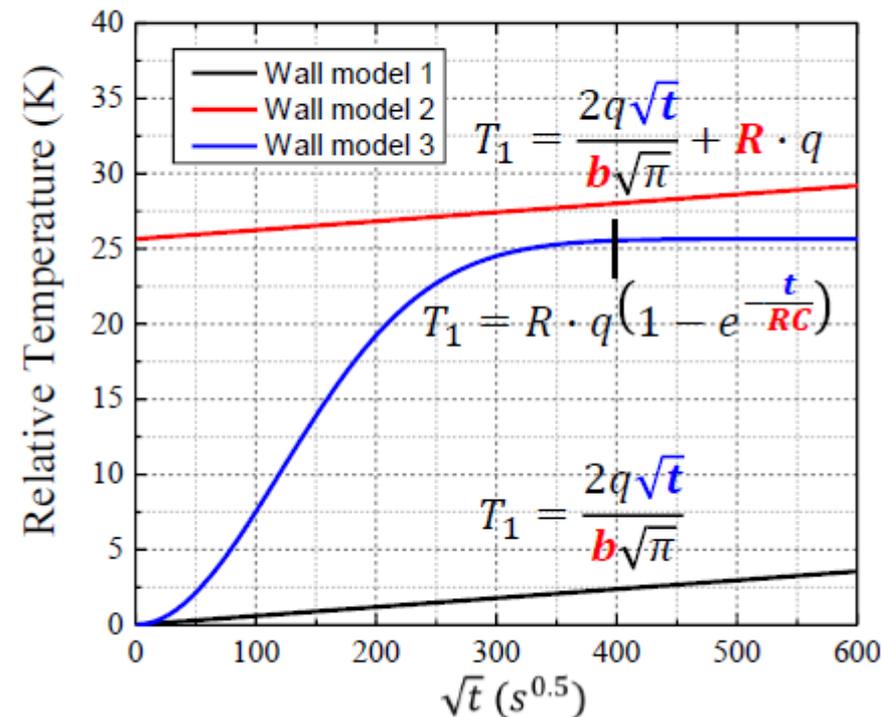


› Même courbe que pour le modèle 1

- Pente donnée par $2/b\sqrt{\pi}$.



Simplified step response

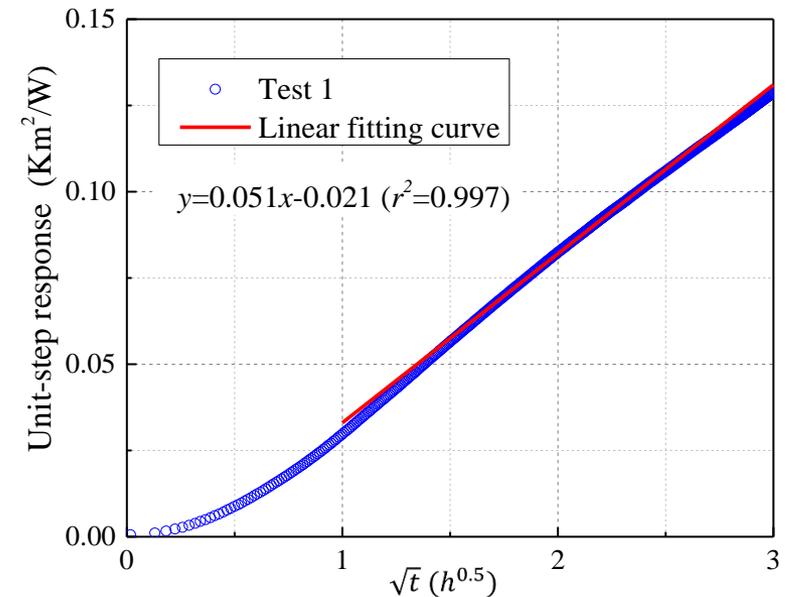


Résultats : paroi IFFSTAR

→ Réponse à un échelon

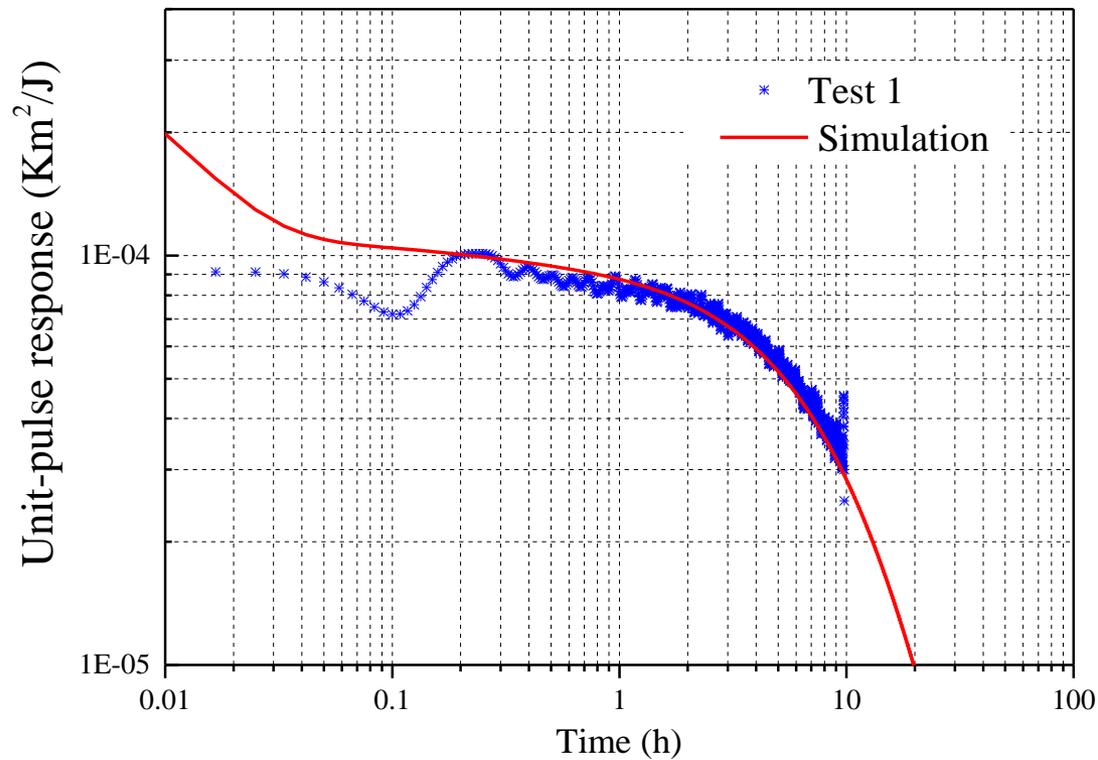
Test	r^2	b (J/ $K \cdot m^2 \cdot s^{0.5}$)	Relative errors to b_{ref}
Test 1	0.997	1328	43.1%
Test 2	1	1233	32.9%
Test 3	0.998	1241	33.7%
Test 4	0.992	1276	37.5%

- › erreur importante mais similaire
 - Doute sur les valeurs de référence



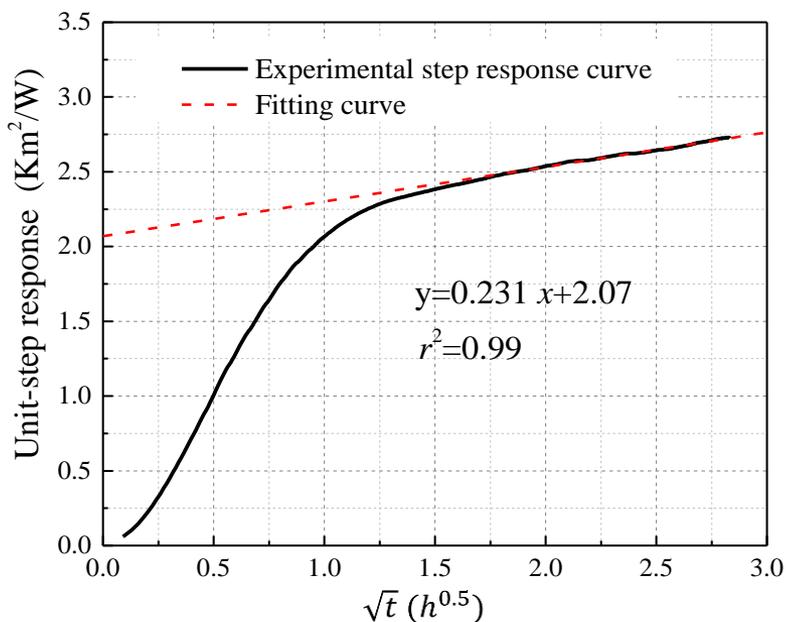
Résultats : paroi IUT

→ Réponse impulsionnelle

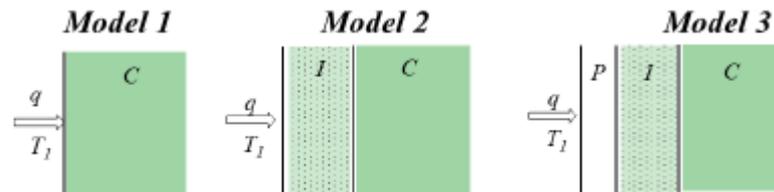


Résultats : paroi IUT

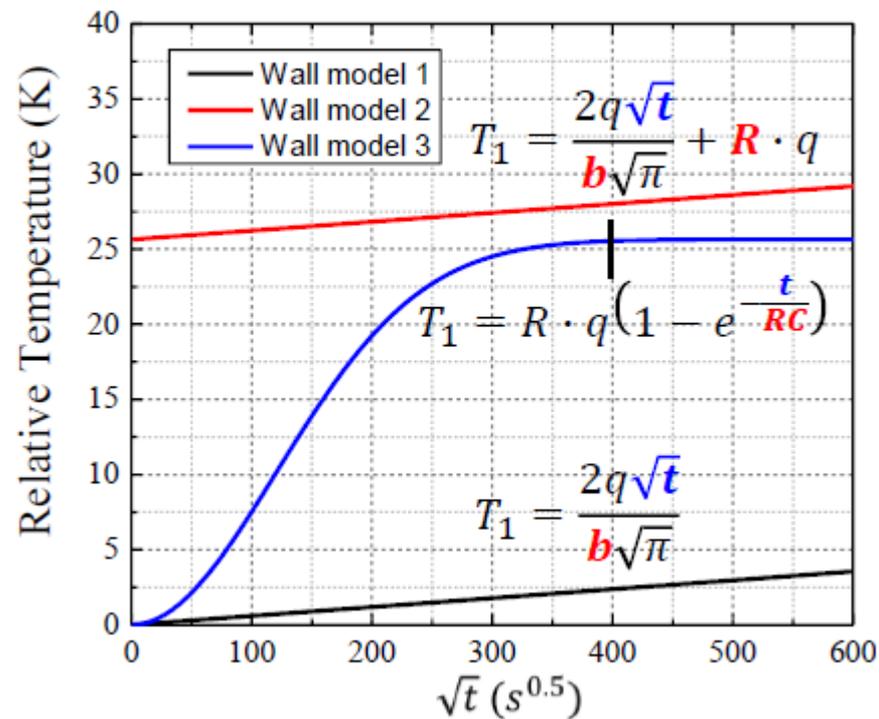
→ Réponse à un échelon



Test	R ($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)	r^2	Relative error to R_{ref}
Test 1	2.07	0.99	-21.3%
Test 2	2.02	0.95	-23.2%
Test 3	2.16	0.93	-17.9%



Simplified step response



Conclusion et Perspectives

- Méthode non destructive et peu intrusive
- Durée inférieure à 10h
- La réponse à l'échelon permet de réduire le bruit
- Plusieurs tests donnent des valeurs très proches
- Justesse difficile à valider par manque de fiabilité des valeurs de référence

- Il faudrait :
 - › Valider la méthode sur des murs dont on connaît bien les caractéristiques
 - › Tester d'autres signaux
 - › Valider le choix de l'instrumentation (fluxmètre, caméra IR)
 - › Passer à un modèle 2D

Pour aller plus loin

→ Travaux consultables dans :

« Innovative non-destructive methodology for energy diagnosis of building envelope », Yang Y., Doctorat de l'université de Bordeaux, 2017

« Short time non-destructive evaluation of thermal performances of building walls by studying transient heat transfer », Yang Y., Wu T.V., Sempey A., Dumoulin J., Batsale J.-C., Energy and buildings, 2019

→ Autres travaux :

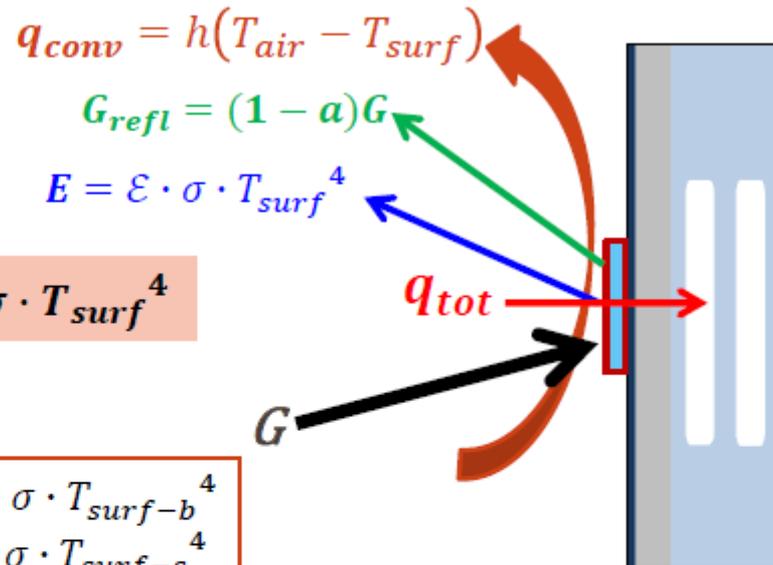
« Combination of terahertz radiation method and thermal probe method for non-destructive thermal diagnosis of thick building walls », Yang Y., Wu T.V., Sempey A., Sommier A., Batsale J.-C., Energy and buildings, 2018

Remerciements

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 637221. The sole responsibility for the content of this paper lies with the authors. It does not necessarily reflect the opinion of the European Union. Neither the EACI nor the European Commission is responsible for any use that may be made of the information contained therein.



Estimation du flux de chaleur



$$q_{tot} = a G + h(T_{air} - T_{surf}) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{surf}^4$$

shiny, black, wall

$$q_{tot-b} = a_b G + h_b(T_{air} - T_{surf-b}) - \varepsilon_b \cdot \sigma \cdot T_{surf-b}^4$$

$$q_{tot-s} = a_s G + h_s(T_{air} - T_{surf-s}) - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_{surf-s}^4$$

Assume: $h_b = h_s$

Obtain: G, h_s

h_{wall}

1. Assume: $h_{wall} = h_s$ (only for captec fluxmeter)
2. h_{wall} by prediction model (Peltier sensor)

$$q_{tot-wall} = a_{wall} G + h_{wall}(T_{air} - T_{surf-wall}) - \varepsilon_{wall} \cdot \sigma \cdot T_{surf-wall}^4;$$