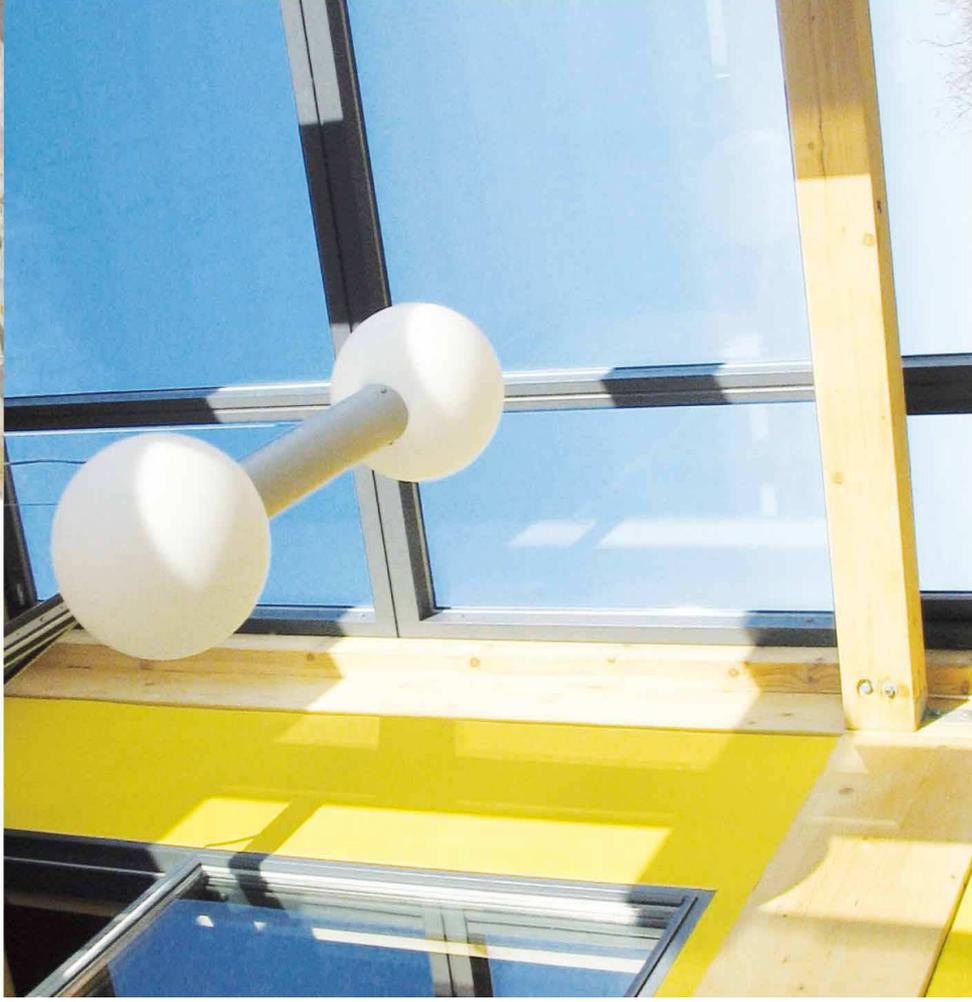




Université Lille Nord de France



Laboratoire
Génie Civil
et géo-Environnement
Lille Nord de France



Habitat

Géomatériaux

géo-Environnement

Caractérisation Thermophysique in situ de parois de bâtiments en utilisant des fonctions de transfert.

Tingting WU, Franck BRACHELET,
Emmanuel ANTCZAK, Didier DEFER,
LGCgE, Université d'Artois, Béthune

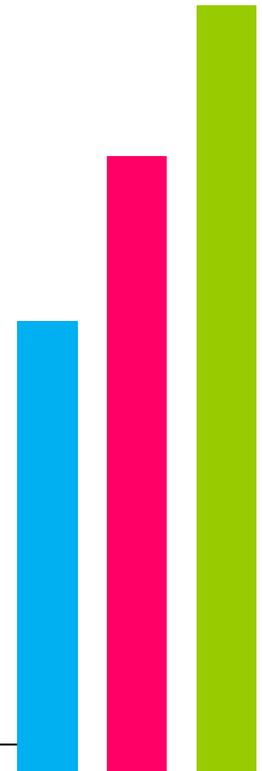
Habitat

Géomatériaux

géo-Environnement

Contexte / Parois de bâtiment

- Renforcement de la réglementation thermique des bâtiments
- Maîtrise de la consommation énergétique
- Développement de nouveaux procédés constructifs
- Développement de nouveaux matériaux
 - Matériaux revalorisés
 - Matériaux agro-sourcés



Intérêt de la caractérisation in situ

- Spécificités
 - importance de la qualité de la mise en œuvre
 - évolution en fonction de temps
 - tassement
 - sensibilité des matériaux à la teneur en eau
 - long terme
- Diagnostic
 - diagnostic avant rénovation
 - Stratégie et optimisation des investissements
 - diagnostic après rénovation
 - Performance des parois rénovées





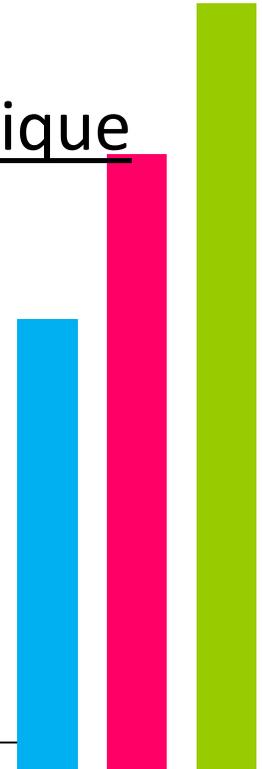
Objectifs de la caractérisation de parois

- Performance en isolation thermique (réduction des déperditions)
- Stockage – inertie (confort thermique)
- Déphasage - optimisation des apports gratuits



Approches mises en œuvre

- Identification de caractéristiques thermophysiques et géométriques par études de fonctions de transfert.
 - Couplage flux/température dans une surface isotherme : formalisme de l'impédance thermique
 - Couplage grandeurs généralisées de flux et de températures dans deux plans isothermes : formalisme des impédances généralisées



Impédance

- Définition $Z_s(j\omega) = \frac{\theta_s(j\omega)}{\varphi_s(j\omega)}$
- Application :
 - Mesure de l'effusivité d'un matériau
 - Suivi de grandeurs corrélées (teneur en eau)
 - Mise en évidence et localisation d'anomalies structurelles



Impédances généralisées

Somme des températures : $\Sigma\theta(t) = \theta_e(t) + \theta_s(t)$

Différence des températures : $\Delta\theta(t) = \theta_e(t) - \theta_s(t)$

Somme des flux : $\Sigma\varphi(t) = \varphi_e(t) + \varphi_s(t)$

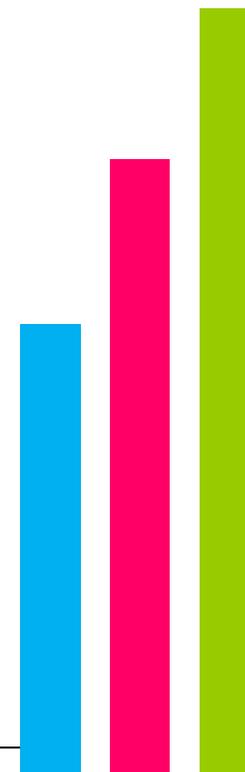
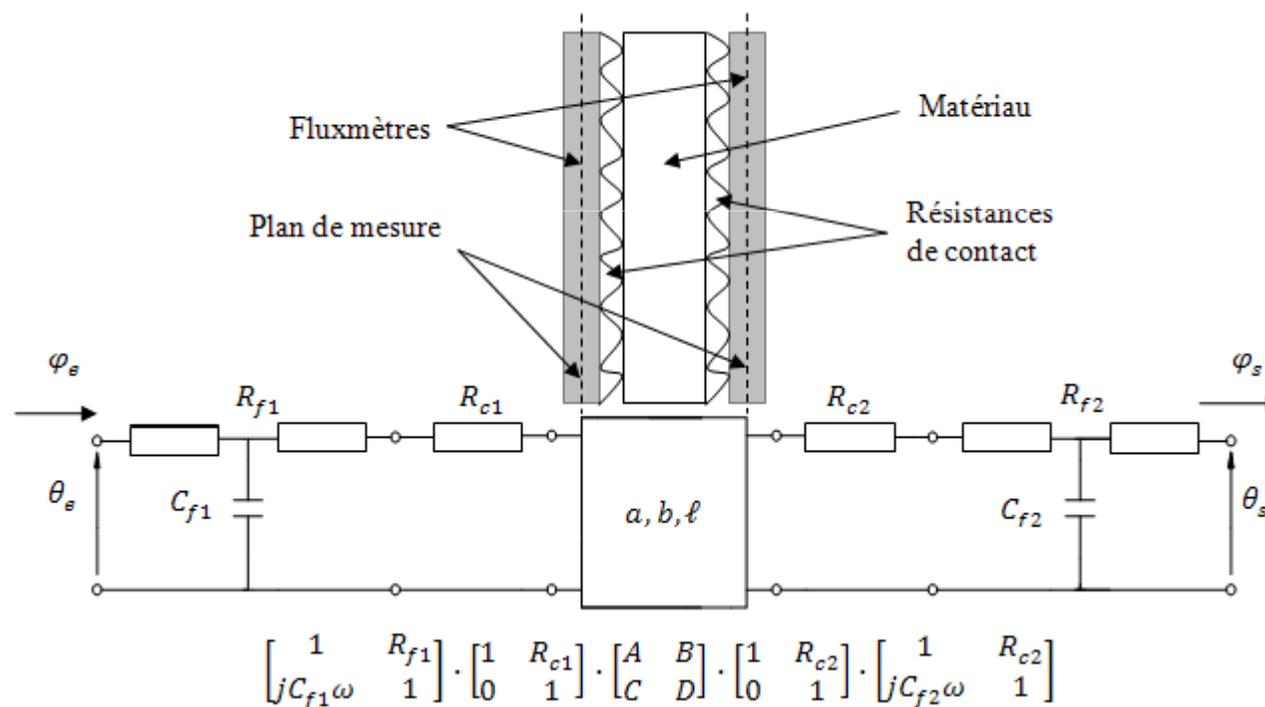
Différence des flux : $\Delta\varphi(t) = \varphi_e(t) - \varphi_s(t)$

Avec
$$\begin{bmatrix} \Sigma\varphi(j\omega) \\ \Delta\varphi(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & H_2 \\ H_2 & H_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(j\omega) \\ \Sigma\theta(j\omega) \end{bmatrix}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} E & G \\ H & F \end{bmatrix} \text{ et } H_1 = \frac{1 + \frac{E+F}{2}}{G}, H_2 = \frac{F-E}{2G}, H_3 = \frac{-1 + \frac{E+F}{2}}{G}$$



Configuration correspondant à une paroi homogène



Fonctions H dans le cas de la paroi homogène

$$R_{f1} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{f2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$C_{f1} = 800 \text{ J} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

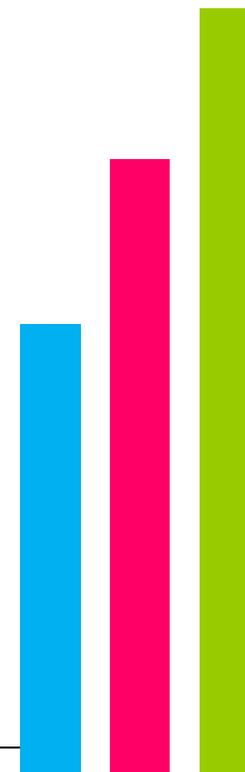
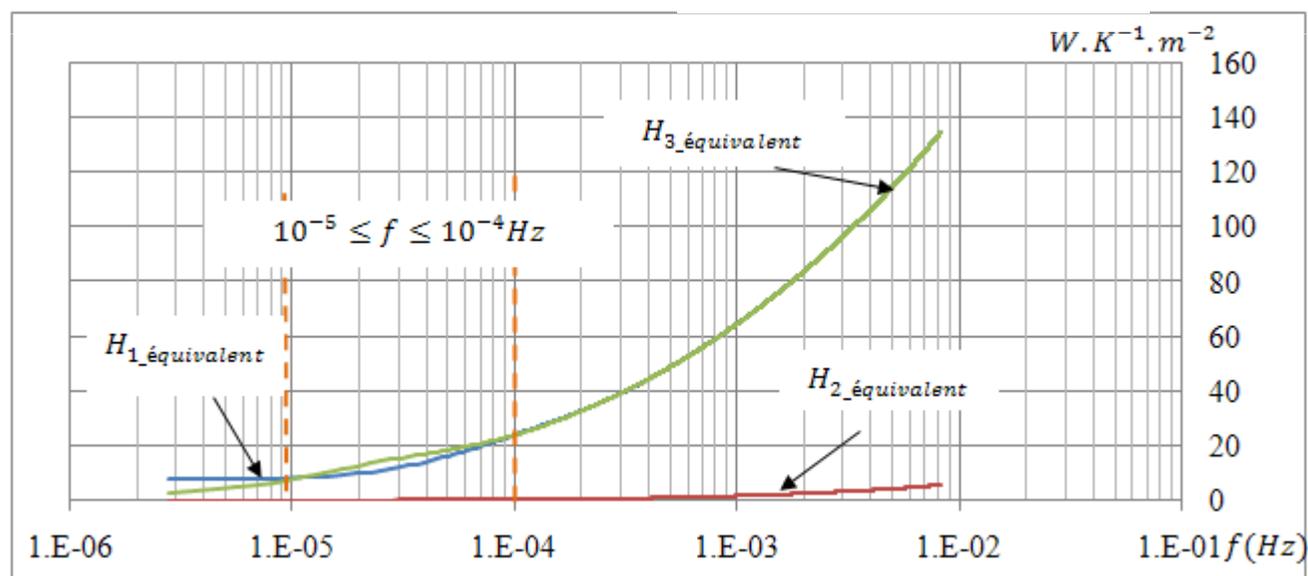
$$C_{f2} = 600 \text{ J} \cdot \text{W}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$$

$$R_{c1} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$R_{c2} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{W}^{-1}$$

$$a = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$b = 2000 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$$



Expressions de H_1 et H_3

$$R_{f1} = R_{f2} = R_f$$

$$C_{f1} = C_{f2} = C_f$$

$$R_{c1} = R_{c2} = R_c$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma\varphi(j\omega) \\ \Delta\varphi(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_1 & 0 \\ 0 & H_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta(j\omega) \\ \Sigma\theta(j\omega) \end{bmatrix}$$

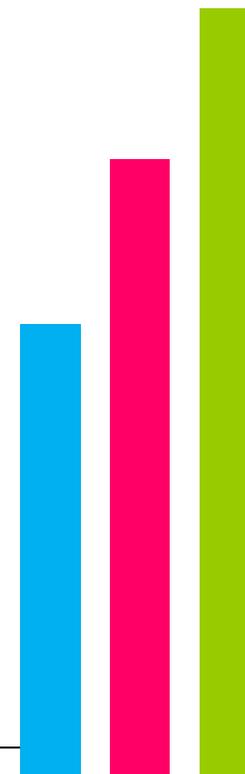
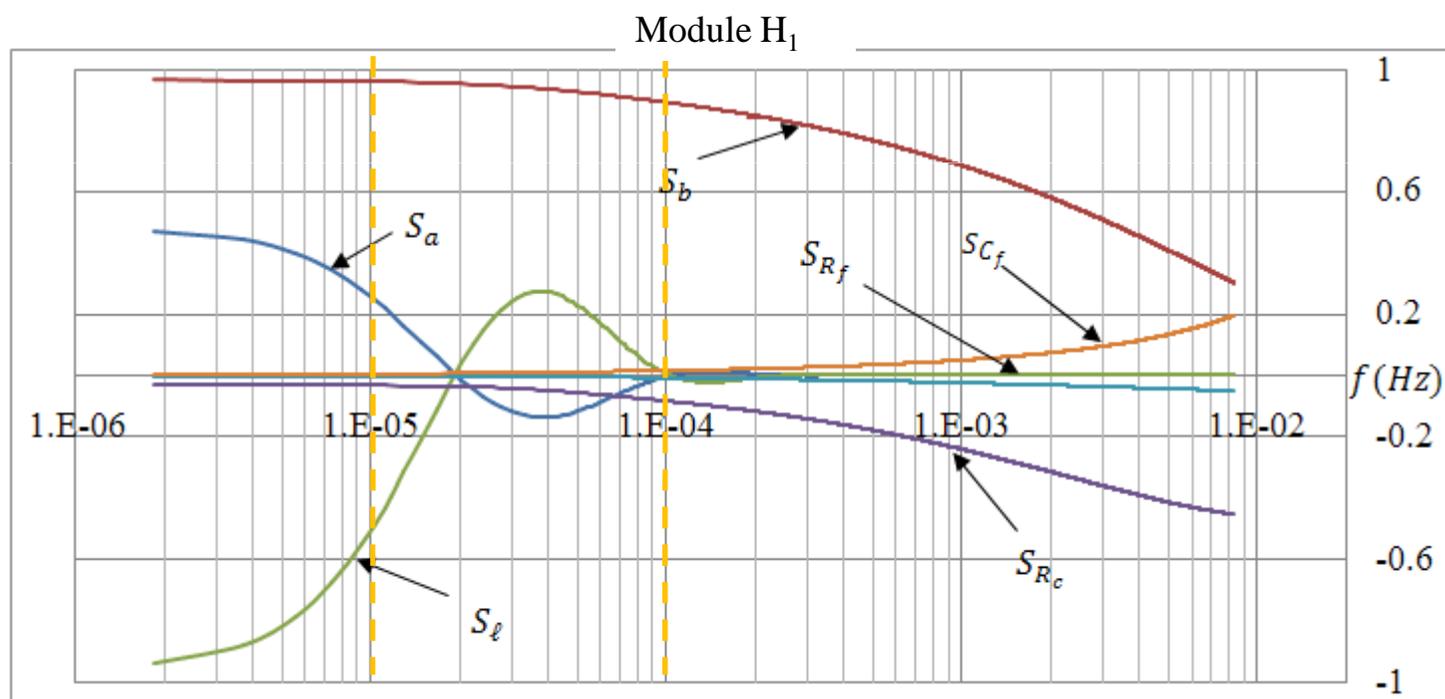
$$X = \ell \sqrt{\frac{j\omega}{a}}$$

$$H_1 = \frac{1 + \cosh(X) \left(1 + jC_f\omega \left(R_f + 2R_c + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right) + (R_f + R_c)(1 + R_c \cdot jC_f\omega) b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right)}{\cosh(X) \left((R_f + R_c) \left(2 + (R_f + R_c) b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right) + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right)}$$

$$H_3 = \frac{-1 + \cosh(X) \left(1 + jC_f\omega \left(R_f + 2R_c + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right) + (R_f + R_c)(1 + R_c \cdot jC_f\omega) b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right)}{\cosh(X) \left((R_f + R_c) \left(2 + (R_f + R_c) b\sqrt{j\omega} \cdot \tanh(X) \right) + \frac{\tanh(X)}{b\sqrt{j\omega}} \right)}$$

Etude de sensibilité

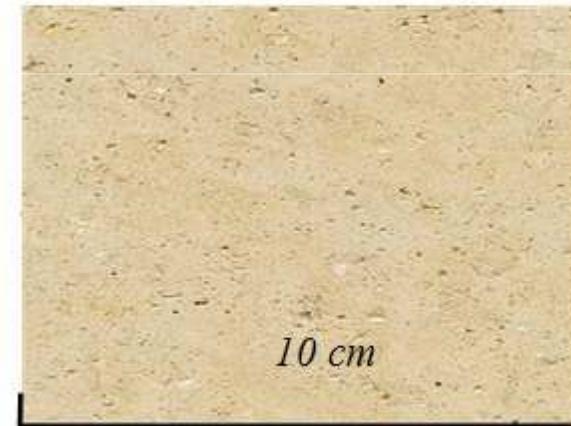
$$S_{p_i}(f) = \frac{\frac{\delta H(p_1, p_2, \dots, p_n, f)}{H(p_1, p_2, \dots, p_n, f)}}{\frac{\delta p_i}{p_i}}$$



Etude d'une paroi en pierre calcaire

Originnaire du Bassin parisien, utilisée depuis de nombreux siècles pour la construction de bâtiments

- Masse volumique d'environ 1750 Kg/m^3 (état sec)
- Porosité d'environ 35% (sensible à l'humidité)



Caractérisation préalable en laboratoire

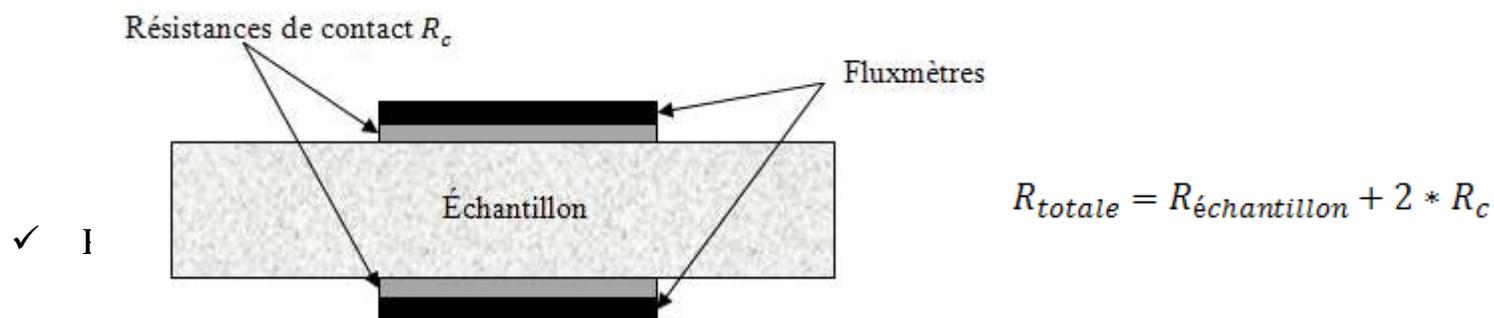
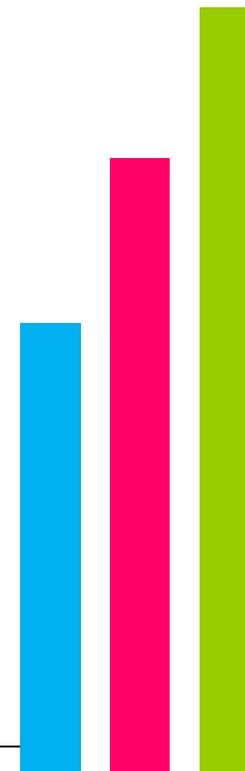
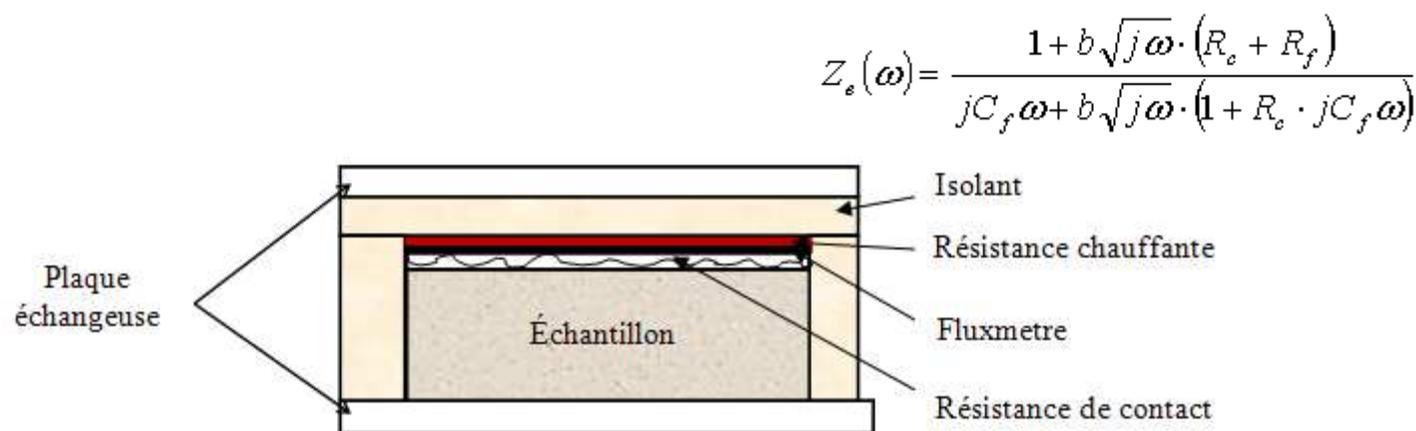
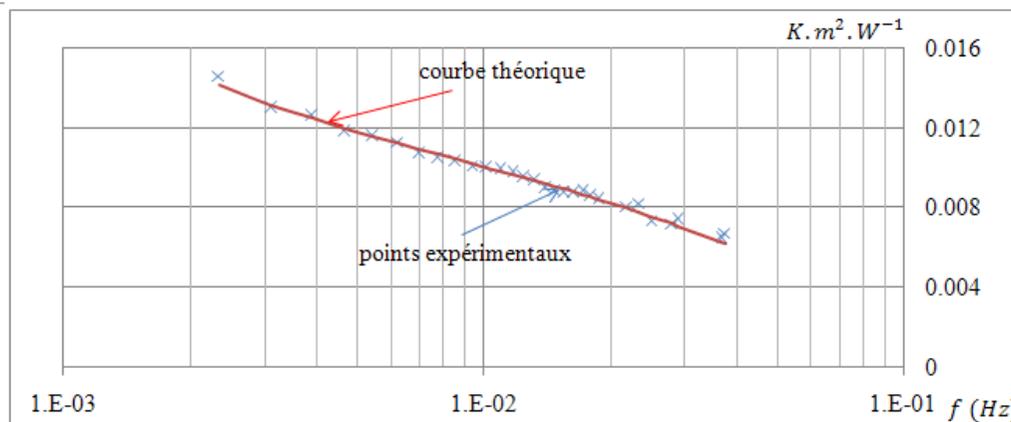
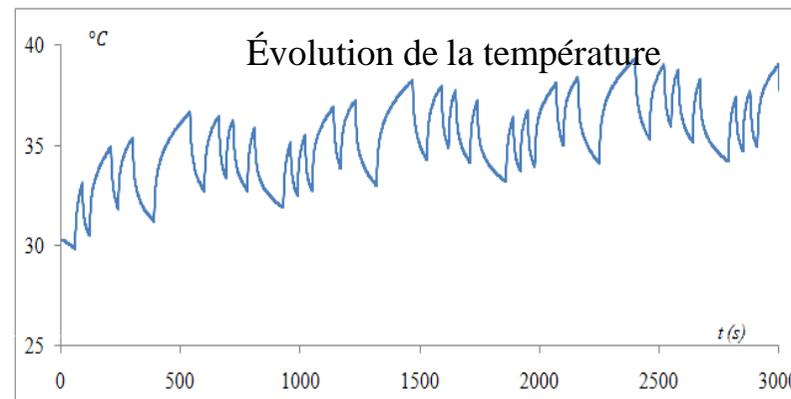
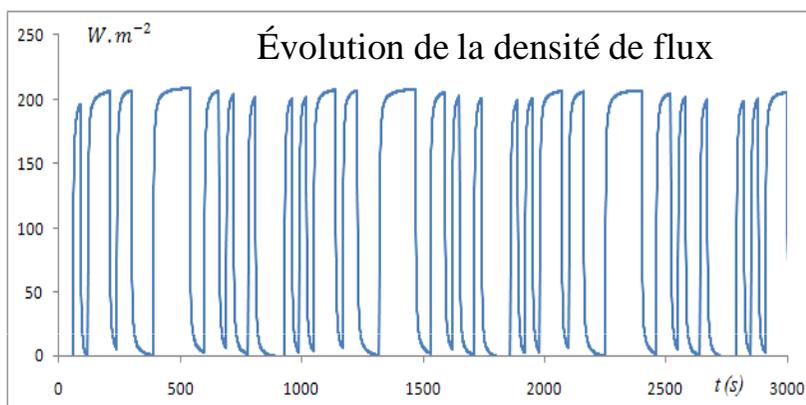


Figure III. 23 : Schéma simplifié du banc de caractérisation

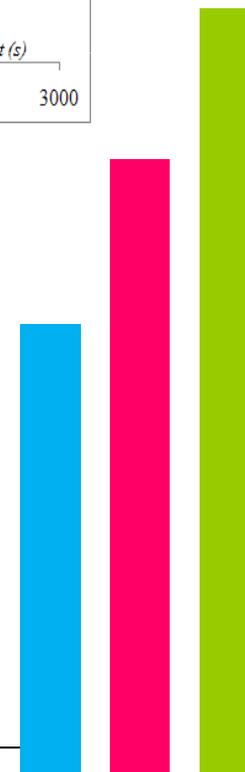


Etude de la résistance de contact

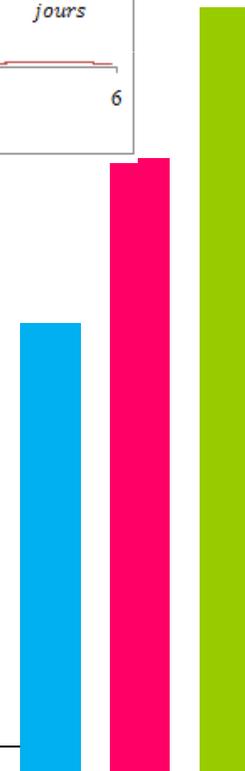
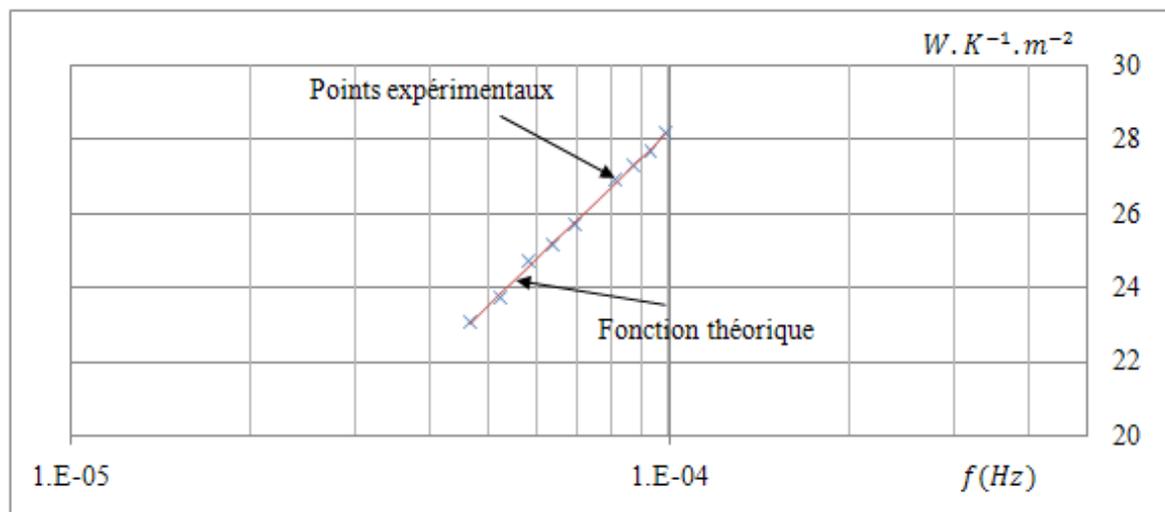
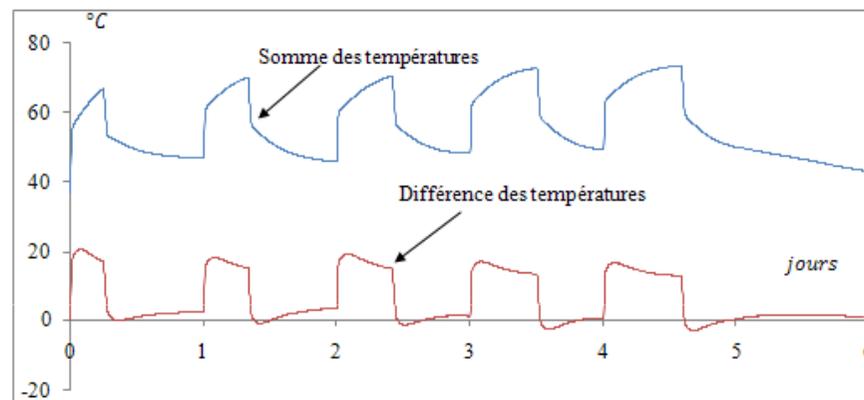
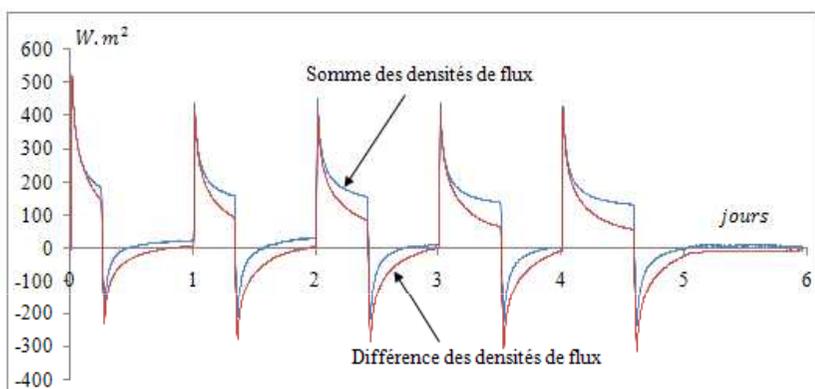


$$b = 1048 \pm 6\% J.K^{-1}.m^{-2}.s^{-1/2}$$

$$R_c = 1.10^{-2} \pm 7,56\% K.m^2.W^{-1}$$

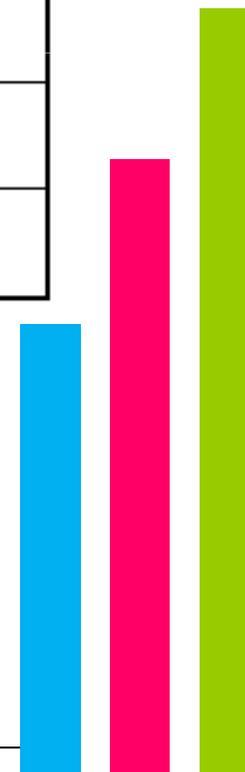


Etude du déphasage

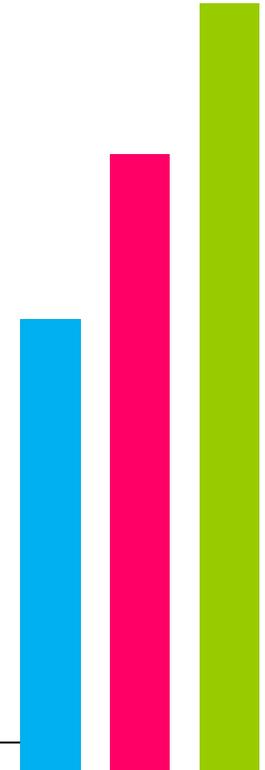
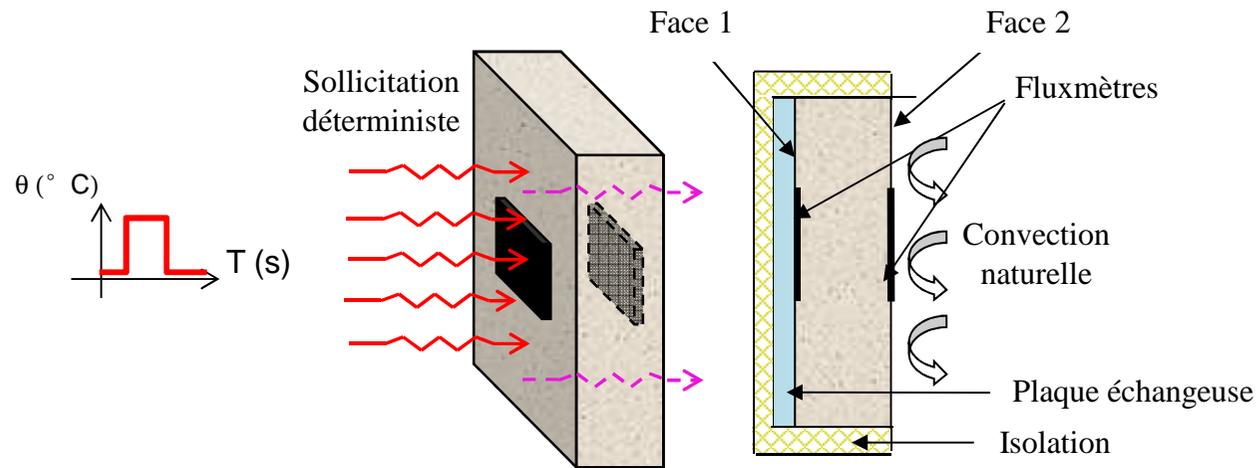


Résultats en laboratoire

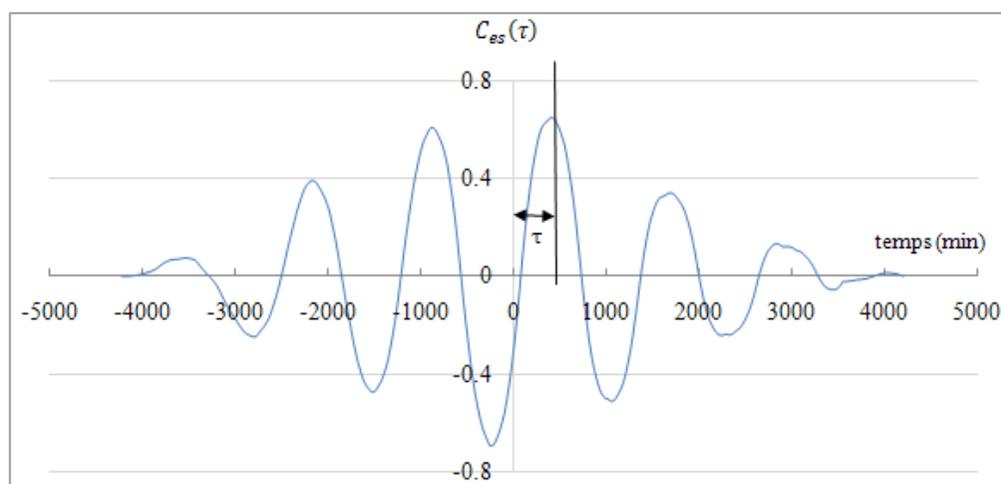
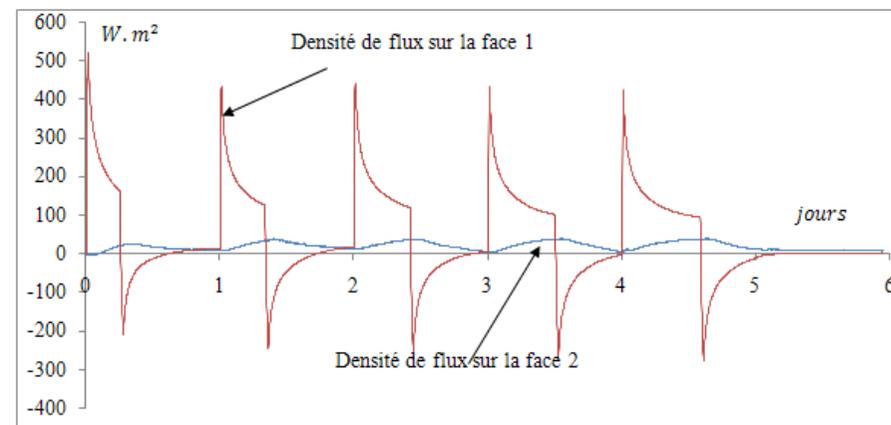
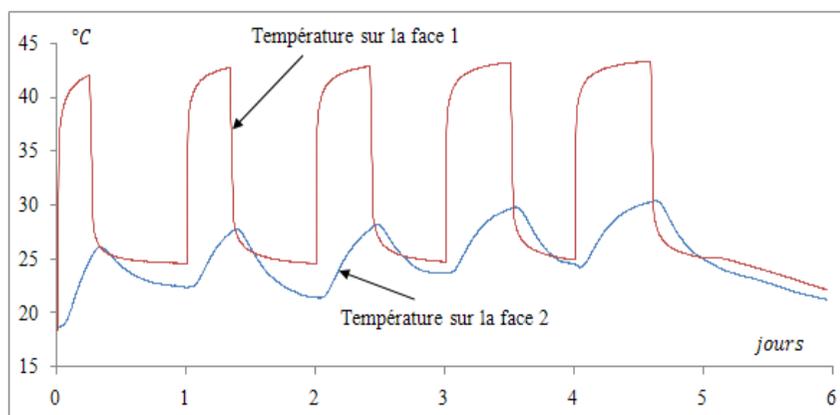
Pierre de Noyant		a	b	λ	ρc
Échantillons	sec	$5,78 \cdot 10^{-7}$ $\pm 6,59\%$	$1034 \pm 3,29\%$	$0,79 \pm 5,41\%$	$1,37 \cdot 10^6$ $\pm 3,76\%$
	saturé	$6,33 \cdot 10^{-7}$ $\pm 8,13\%$	$1806 \pm 4,07\%$	$1,44 \pm 7,18\%$	$2,27 \cdot 10^6$ $\pm 3,82\%$
Parois (H_1)		$5,3 \pm 7,23\%$	$1250 \pm 6,75\%$	$0,91 \pm 4,35\%$	$1,71 \cdot 10^6$ $\pm 7,04\%$
Parois (H_3)		$5,7 \cdot 10^{-7}$ $\pm 7,07\%$	$1350 \pm 6,69\%$	$1,01 \pm 5,02\%$	$1,79 \cdot 10^6$ $\pm 6,98\%$



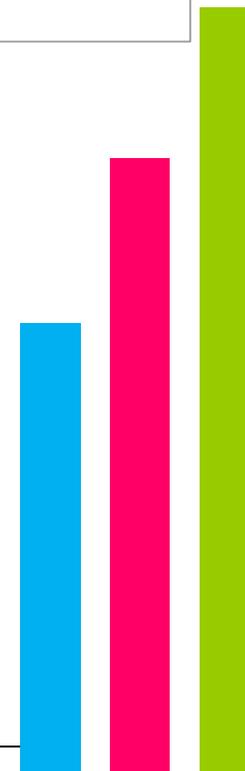
Etude du déphasage



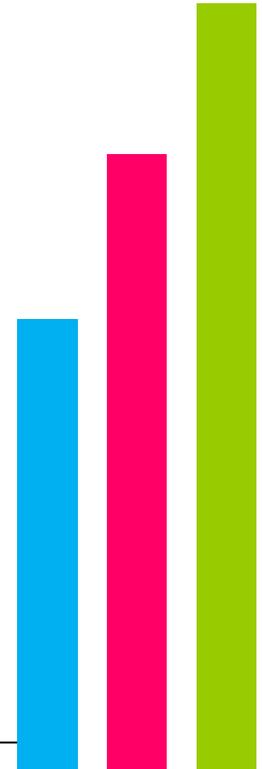
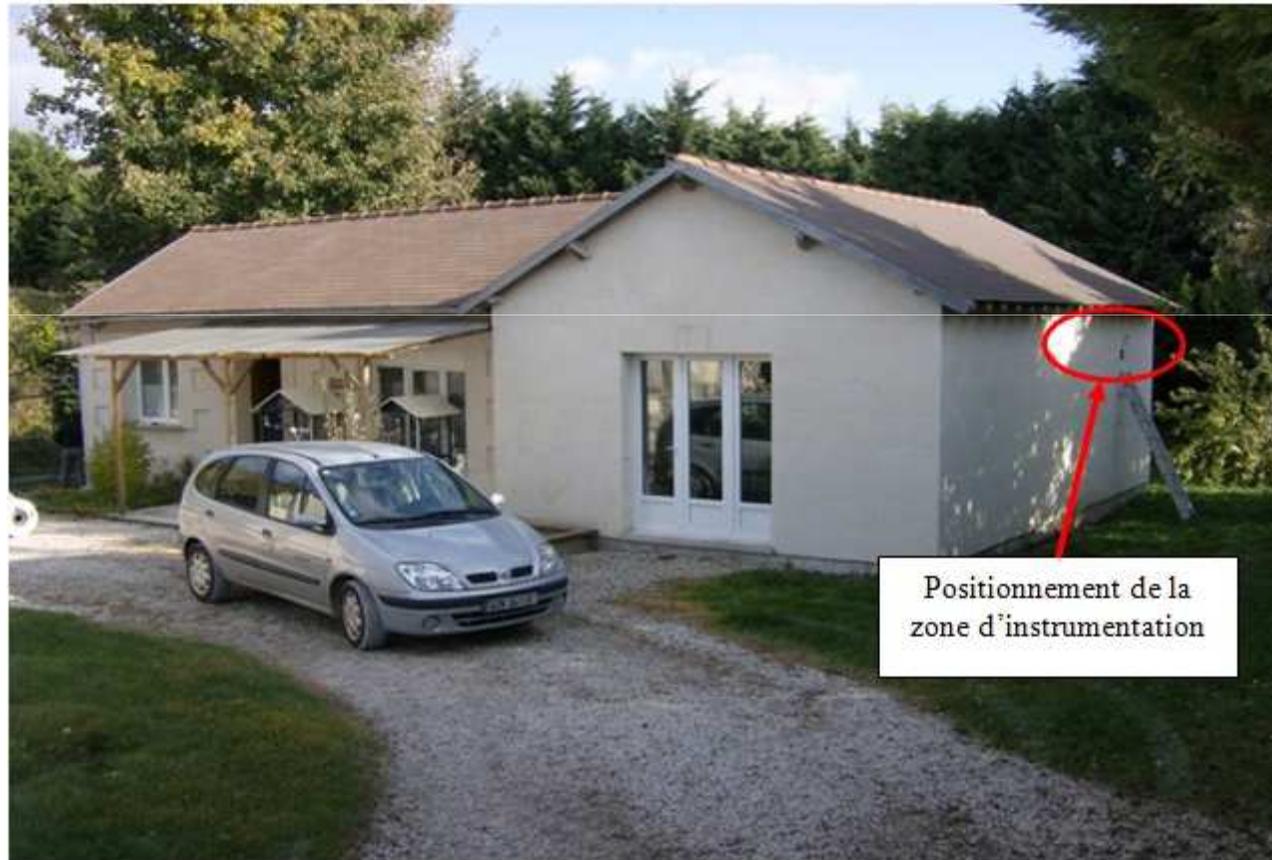
Etude du déphasage



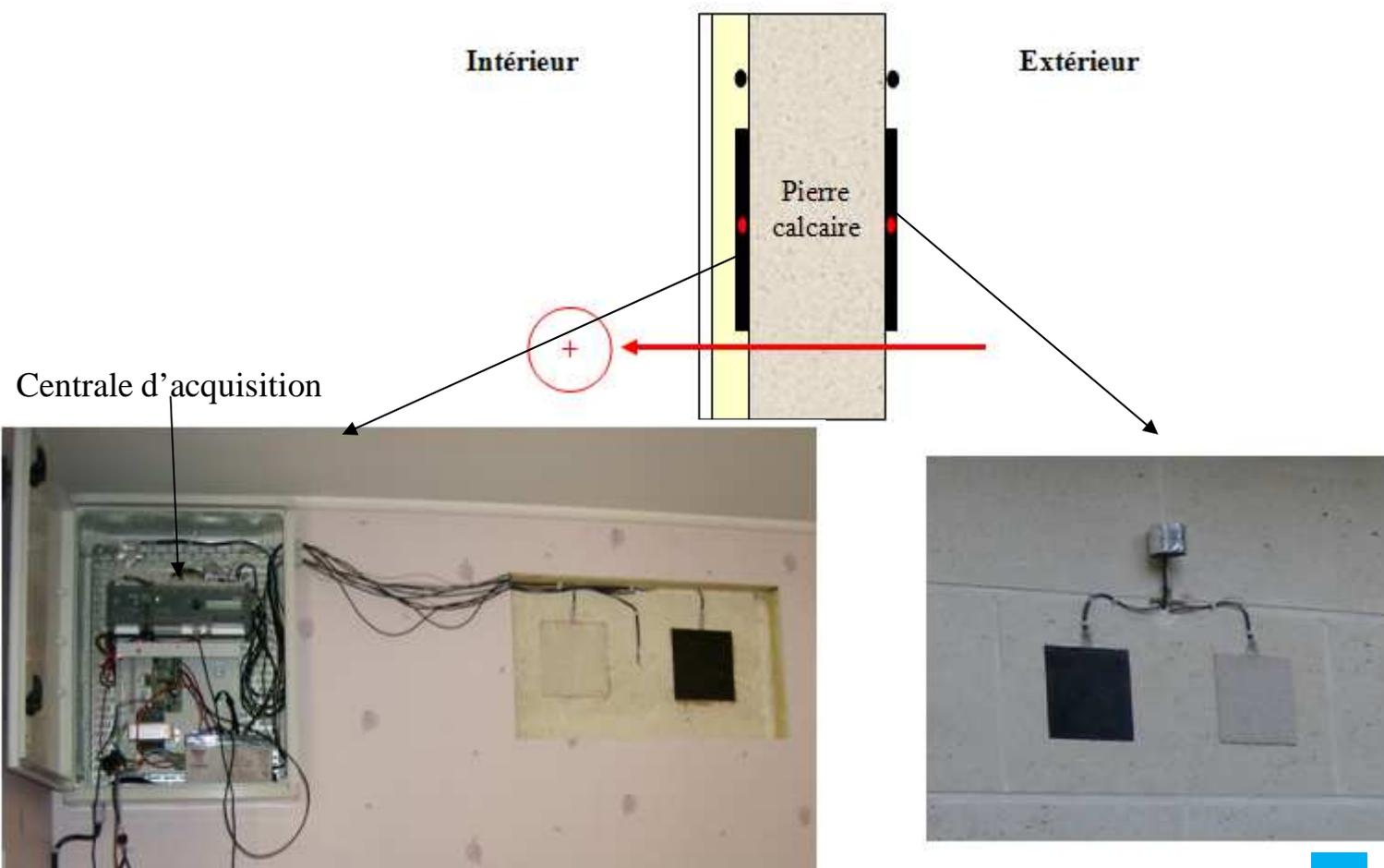
$$\tau = 443 \text{ min} \pm 7\%$$



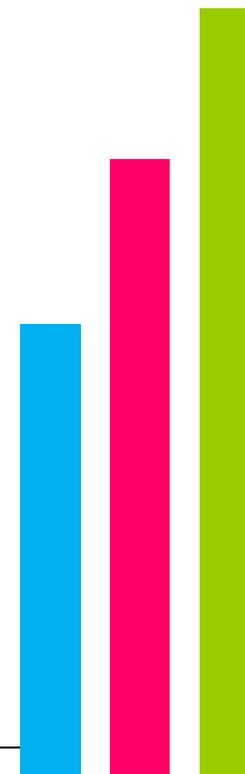
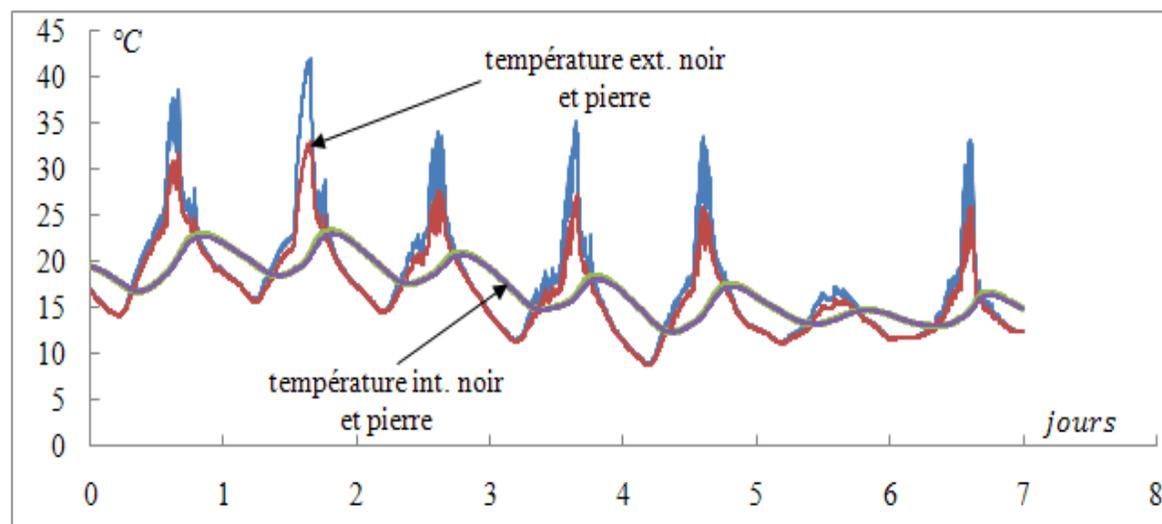
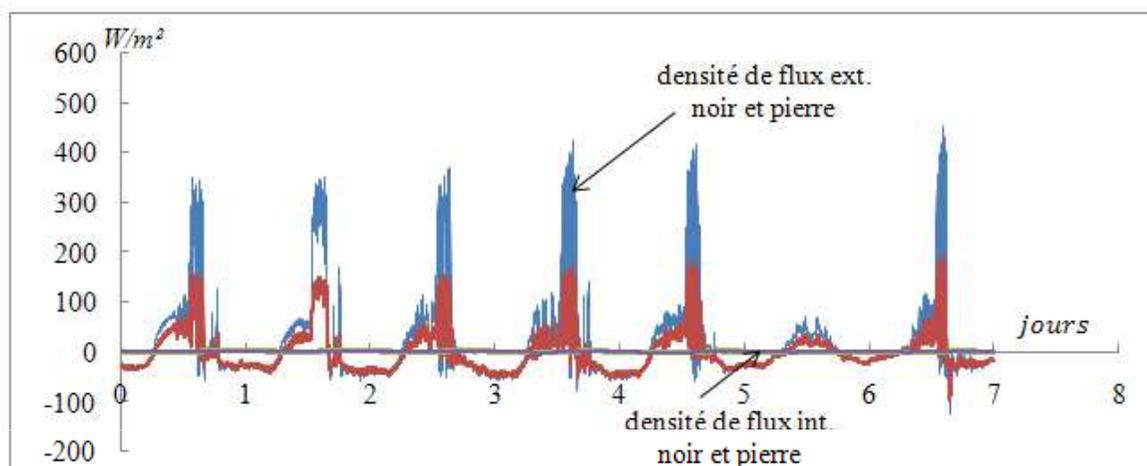
Etude in situ



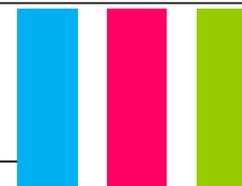
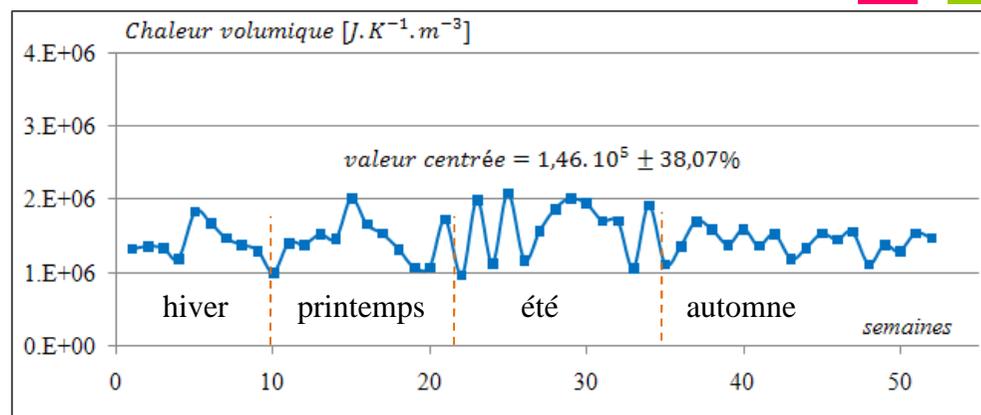
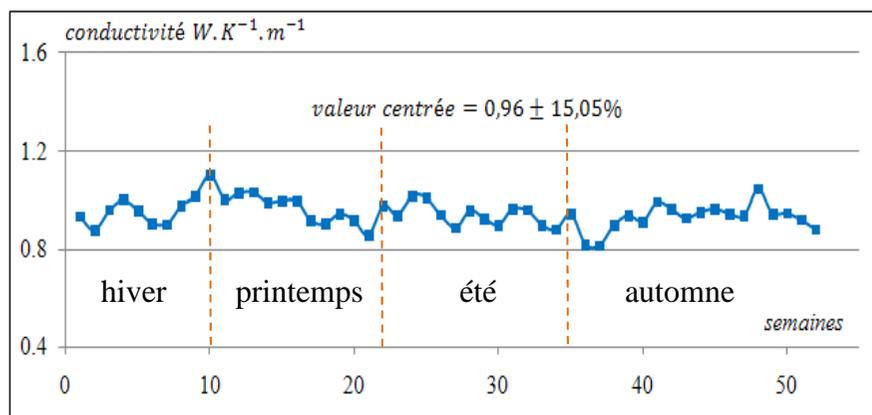
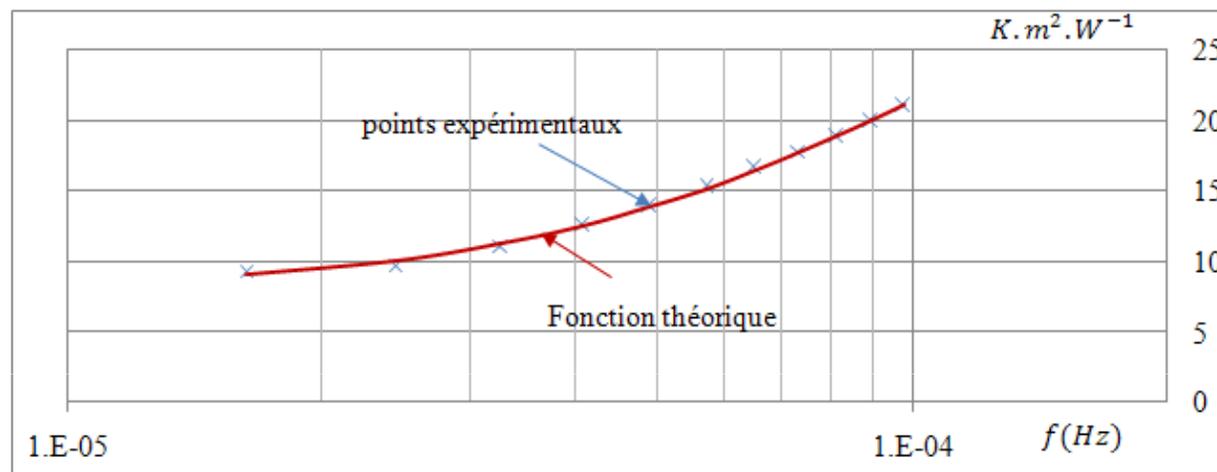
Mesures in situ



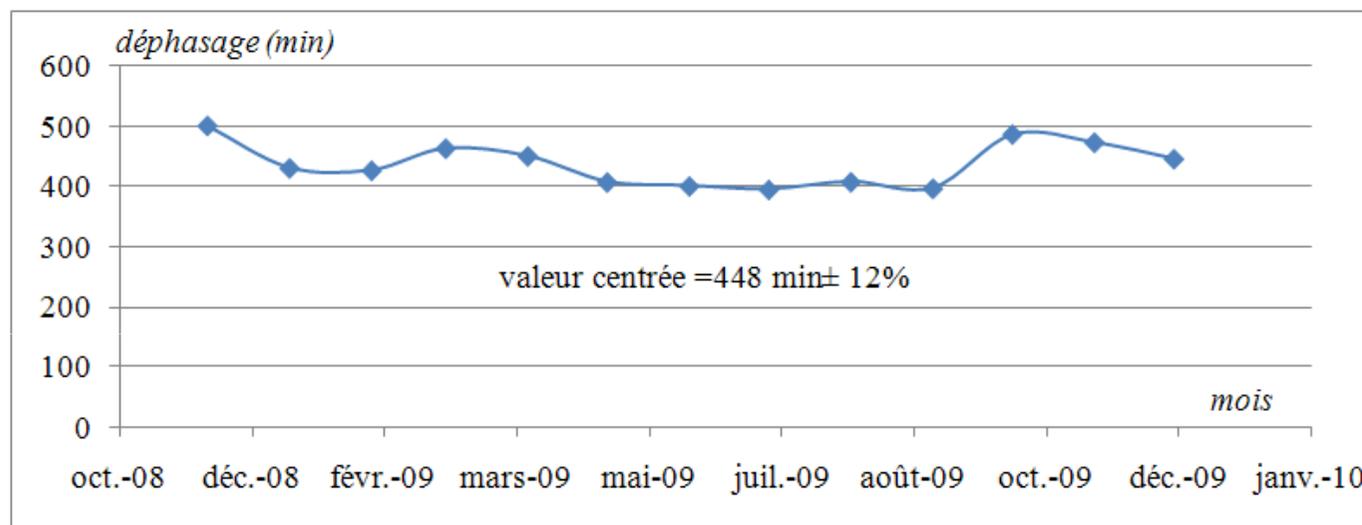
Mesures in situ



Résultats des traitements



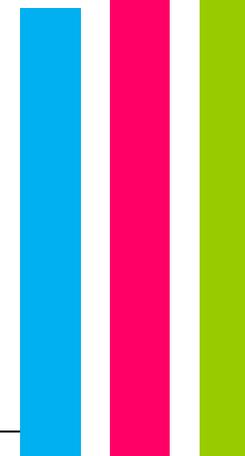
- **Étude de la pierre calcaire**
 - Mesures *in situ* (bâtiment en pierre calcaire de Noyant)
- ✓ Déphasage



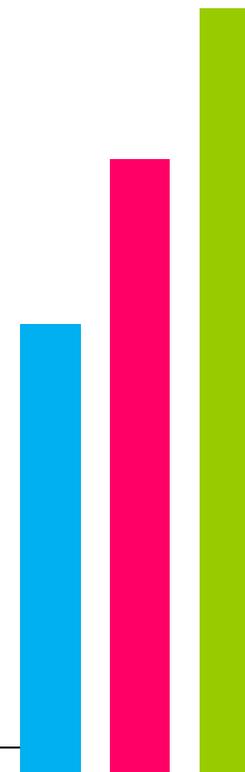
Norme NF EN ISO 13786	Mesures en laboratoire	Mesures <i>in situ</i>
$\tau_{sec} = 409 \text{ min}$ $\tau_{saturé} = 466 \text{ min}$	$\tau_{moyen_écart\ type} =$ $443 \pm 7\% \text{ min}$	$\tau_{min} = 396 \text{ min}$ $\tau_{max} = 500 \text{ min}$



Pierre calcaire	λ [W.K ⁻¹ .m ⁻¹]	ρc [J.K ⁻¹ .m ⁻³]	τ [min]
Échantillon	$\lambda_{sec} = 0,79 \pm 7,18\%$ $\lambda_{saturé} = 1,44 \pm 5,40\%$	$\rho c_{sec} = 1,36.10^6 \pm 3,76\%$ $\rho c_{saturé} = 2,27.10^6 \pm 3,82\%$	
Normes			$\tau_{sec} = 409$ $\tau_{saturé} = 466$
Parois en laboratoire	$0,91 \pm 4,35\%$	$1,71.10^6 \pm 7,04\%$	$\tau_{moyen_écart\ type} =$ $443 \pm 7\%$
Mesures <i>in situ</i>	$\lambda_{centré} = 0,96 \pm 15,05\%$	$\rho c_{centré} = 1,46 \pm 38,07\%$	$\tau_{min} = 396$ $\tau_{max} = 500$

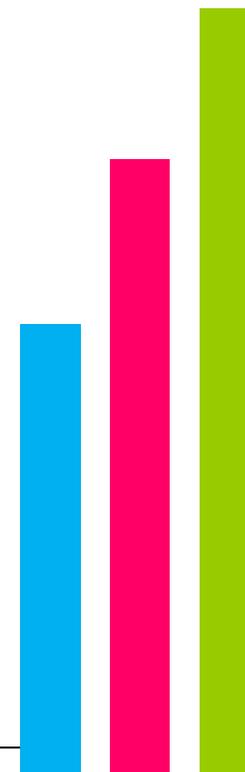
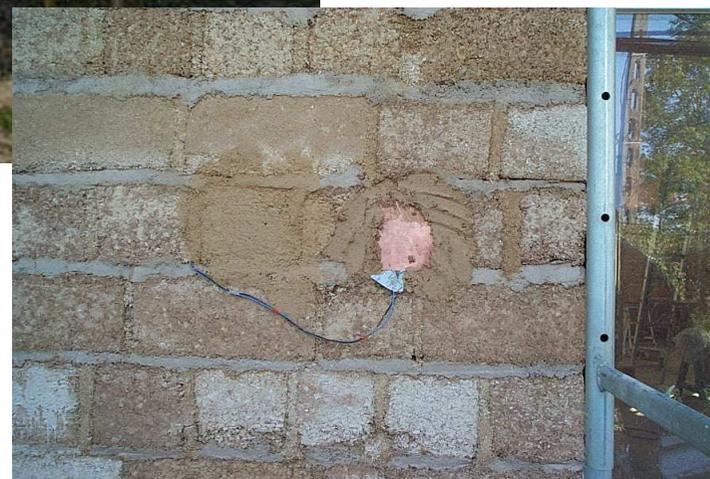
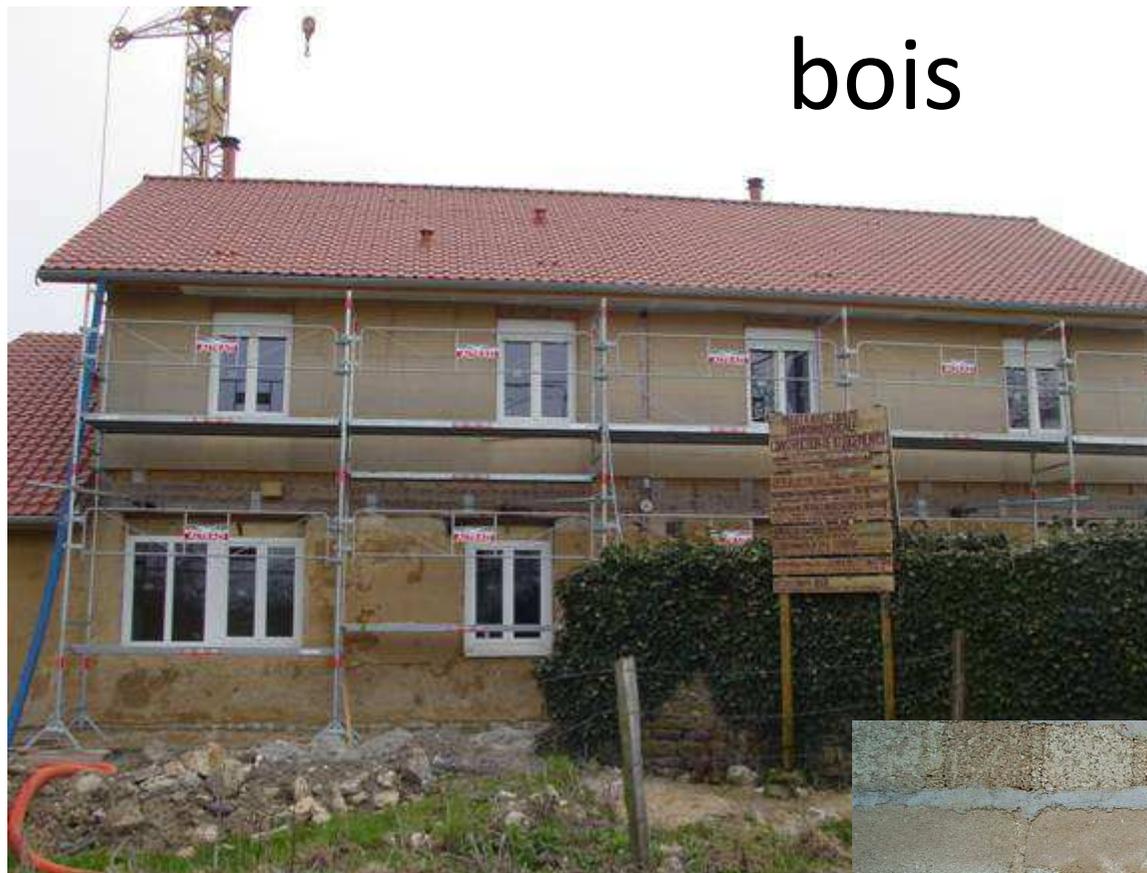


Etude d'une paroi en bois





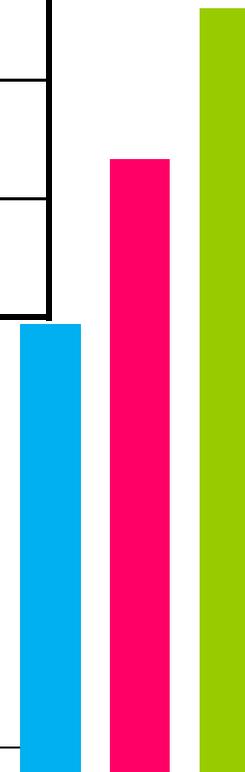
Etude d'une paroi en adobe terre- bois





Variation des propriétés thermophysiques équivalentes de la paroi pendant la période de suivi

Date	effusivité équivalente (J.K-1.m-2.s-1/2)	diffusivité équivalente m2.s-1	lambda équivalent W.m-1.K-1	ρc équivalent J.K-1.m-3 *1e7
29/04	645	8.36E-07	0.59	7.06E+05
10/08	630	7.09E-07	0.53	7.48E+05
19/10	519	5.35E-07	0.38	7.10E+05
20/12	456	4.34E-07	0.30	6.92E+05



Conclusions

- Intérêt de la caractérisation in situ de paroi
- Couplage flux/température
 - Caractérisation thermophysique de la paroi
 - Résistance
 - Stockage
 - Déphasage
 - Fluxmètre adapté à l'étude de matériaux hétérogènes
 - Mise en évidence des phénomènes
 - Apports
 - Déperditions



Conclusions

- Mesure dans la partie courante
- Limitation aux transferts 1D
- Mesure ponctuelle
- Capteur limitant les transferts de masses
- Méthode testée sur parois homogènes
- Approche peut adaptée aux parois ventilées





Merci de votre attention

