



CARACTERISATION THERMIQUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION HYDROPHILES

Yves Jannot, Christian Moyne, Veneta Grigorova-Moutiers

Journée SFT, 2 mai 2018

PLAN DE LA PRESENTATION

- Quels matériaux de construction sont hydrophiles ?
- Matériaux hydrophiles : la problématique
- Les équations de transfert de chaleur et de masse
- Les deux conductivités thermiques d'un milieu humide
- Mesure en régime transitoire : peut-on utiliser un modèle réduit ?
- Mesure en régime permanent
- Conclusions

QUELS MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION SONT HYDROPHILES ?

❑ Les isolants biosourcés ou nanoporeux ($\lambda < 0,1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

- Laine de bois (5 à 10 % d'eau)
- Ouate de cellulose, liège
- Chanvre, paille



❑ Les matériaux « intermédiaires » ($0,1 < \lambda < 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

- Bois (≈ 10 % d'eau)
- Béton cellulaire, plâtre



❑ Les matériaux porteurs ($\lambda > 1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$)

- Bétons, mortiers
- Briques de terre stabilisée



MATÉRIAUX HYDROPHILES : LA PROBLÉMATIQUE

- ❑ **Peut-on mesurer la conductivité thermique en fonction de l'humidité par une mesure en régime transitoire :**
 - en utilisant un modèle réduit aux transferts thermiques ?
 - en utilisant un modèle couplé chaleur/masse ?

- ❑ **Peut-on calculer des variations de température en utilisant un modèle réduit aux transferts thermiques ?**

- ❑ **Quelle méthode utiliser pour en mesurer la conductivité thermique ?**



Éléments de réponse pour les matériaux isolants

EQUATIONS DU TRANSFERT COUPLÉ CHALEUR/MASSE

Transfert de chaleur :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_0 D_X^v L \frac{\partial X}{\partial x} \right]$$

Conductivité apparente : $\lambda^* = \lambda + \rho_0 D_T^v L$

Diffusivité de la vapeur d'eau dans le solide :

Transfert de masse :

$$\rho_0 \frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_0 \left(D_X^v \frac{\partial X}{\partial x} + D_T^v \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right]$$

Pas de diffusion liquide

$$D_X^v = \frac{\alpha D^* M_v}{\rho_0 RT (1 - x_v)} p_{vs} \frac{dHR}{dX}$$

$$D_T^v = \frac{\alpha D^* M_v}{\rho_0 RT (1 - x_v)} HR \frac{dp_{vs}}{dT}$$

$0 < \alpha < 1$
f (tortuosité)

Diffusivité de la vapeur d'eau dans l'air :

$$D^* = 2,17 \cdot 10^{-5} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,88}$$

Pression de vapeur saturante : $p_{vs}(T) = \exp \left(25,555 - \frac{5220}{T} \right)$ $x_v = 0,622 \frac{p_v}{p - p_v}$

Isotherme de sorption (GAB) :

$$X = \frac{X_{12} C K HR}{(1 - K HR) (1 + C K HR - K HR)}$$

EQUATIONS DU TRANSFERT COUPLÉ CHALEUR/MASSE

Equation de la chaleur

Régime transitoire :

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_{sec} D_X^v L \frac{\partial X}{\partial x} \right]$$

Conductivité apparente : $\lambda^* = \lambda + \rho_0 D_T^v L$

$$\lambda_{dif} = \rho_0 D_T^v L$$

Régime permanent :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] = 0$$

Conclusions

- Une méthode de régime transitoire utilisant un modèle réduit à la thermique ne peut permettre de mesurer que λ^* et pourra être influencée par les transferts de masse
- Une méthode de régime permanent mesure λ et n'est pas influencée par les transferts de masse

QUELLE DIFFERENCE ENTRE λ ET λ^* ?

Conductivité apparente : $\lambda^* = \lambda + \rho_0 D_T^v L$

$$\lambda_{dif} = \rho_0 D_T^v L \quad \text{avec} \quad D_T^v = \frac{\alpha D^* M_v}{\rho_0 RT (1 - x_v)} HR \frac{dp_{vs}}{dT}$$

Valeurs de λ_{dif} (W m⁻¹ K⁻¹) pour différentes conditions ($\alpha = 0,5$)

		HR (%)		
		20	50	80
T (°C)	5	0,0025	0,0063	0,0101
	15	0,0046	0,0116	0,0187
	30	0,0108	0,0271	0,0438
	45	0,0231	0,0589	0,0962

Conclusion

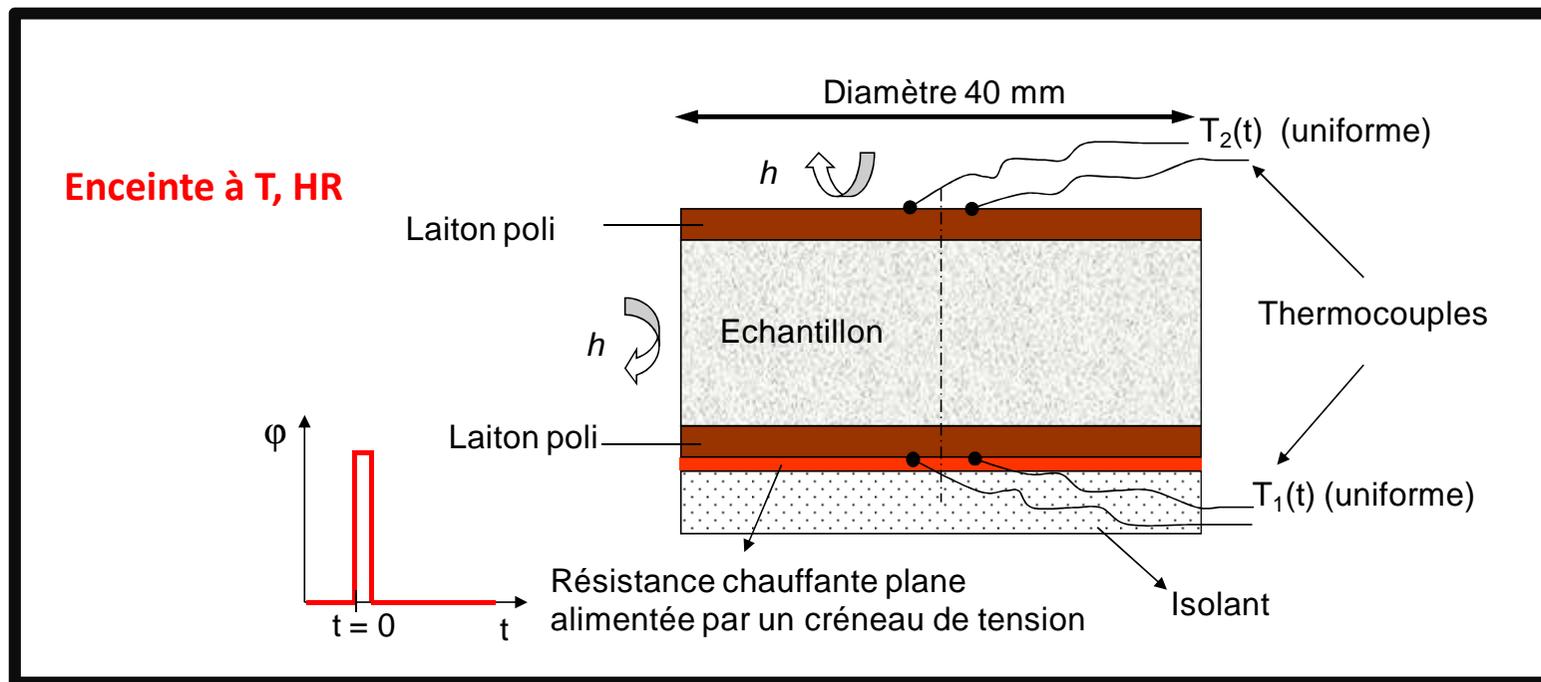
- λ_{dif} est du même ordre de grandeur que la conductivité thermique d'un isolant
- On ne peut négliger λ_{dif} dans le cas d'un isolant thermique
- La valeur de λ_{dif} augmente fortement avec la température

PEUT-ON MESURER λ^* AVEC UN MODÈLE RÉDUIT « THERMIQUE » ?

Il faudrait que : $\rho_0 D_X^v L \frac{\partial X}{\partial x} \ll \lambda^* \frac{\partial T}{\partial x}$ car : $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} + \rho_0 D_X^v L \frac{\partial X}{\partial x} \right]$

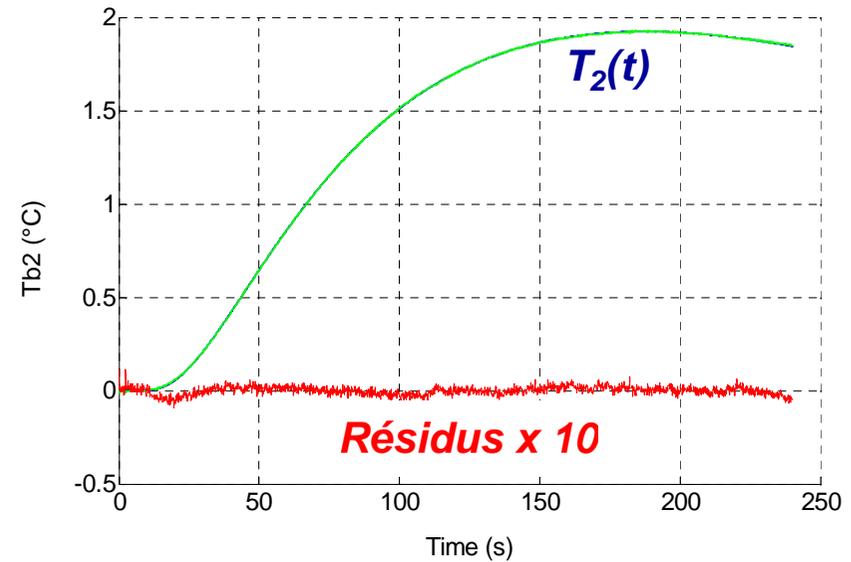
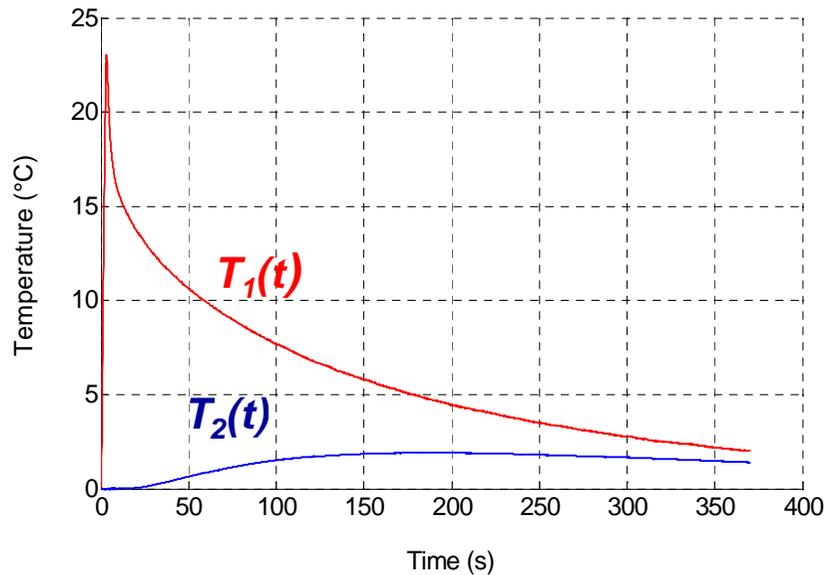
Est-ce toujours le cas ?

Éléments de réponse par une étude expérimentale : Méthode du Tricouche sur un isolant hydrophile



PEUT-ON MESURER λ^* AVEC UN MODÈLE RÉDUIT « THERMIQUE » ?

Principe de la méthode

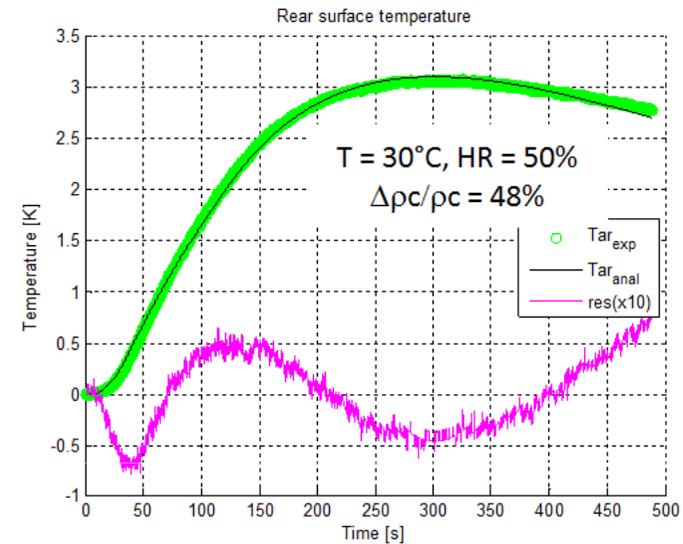
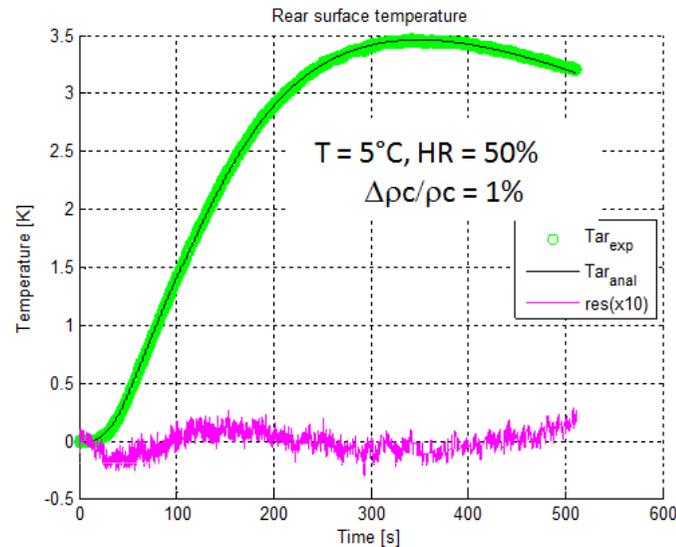


$$T_{2_{mod}}(t) = T_{1_{exp}}(t) \otimes F(t, \lambda, a, h)$$

Estimation de λ , ρc et h minimisant : $\sum [T_{2_{mod}}(t_i) - T_{2_{exp}}(t_i)]^2$

PEUT-ON MESURER λ^* AVEC UN MODÈLE RÉDUIT « THERMIQUE » ?

Résultats



- Les résidus sont signés : le modèle ne prend pas en compte tous les phénomènes physiques
- L'estimation de ρc est biaisée (/ mesure DSC) : celle de λ^* l'est donc très certainement elle aussi
- Les différences entre les valeurs de λ et de λ^* ne correspondent pas aux valeurs de λ_{dif} calculées

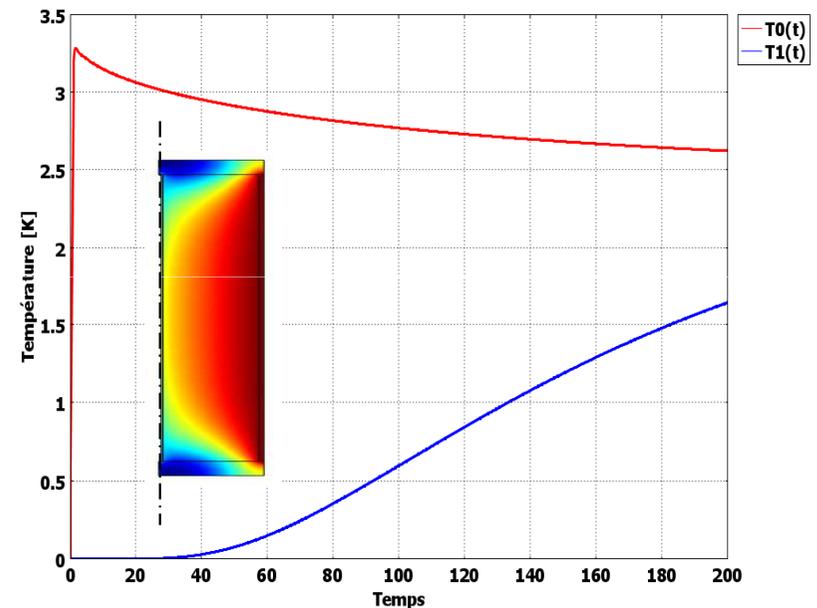
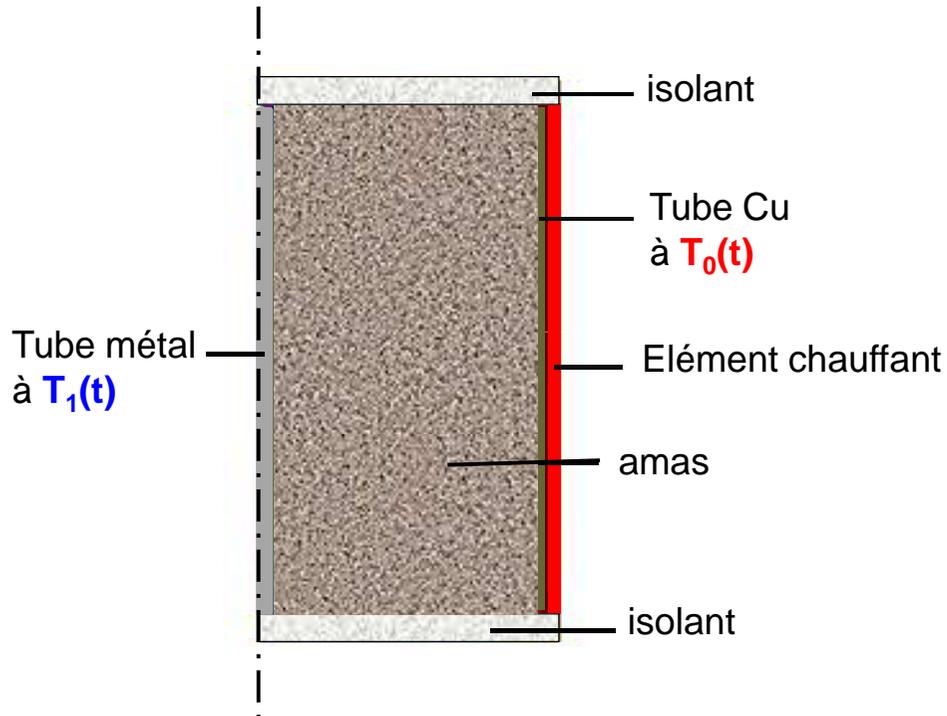
Conclusion

Pas de mesure fiable de la conductivité thermique apparente λ^* en transitoire pour des matériaux isolants humides avec la méthode du Tricouche utilisant un modèle réduit au transfert thermique

PEUT-ON MESURER λ^* AVEC UN MODÈLE RÉDUIT « THERMIQUE » ?

La méthode du Tricouche plan est-elle un cas particulier ?

Méthode du Tricouche cylindrique pour les matériaux en amas



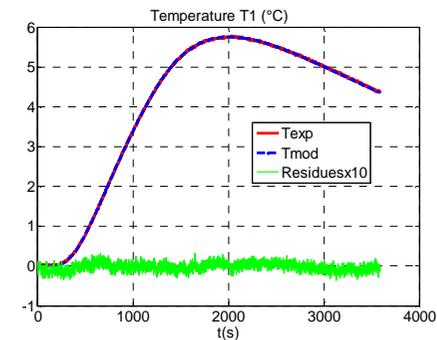
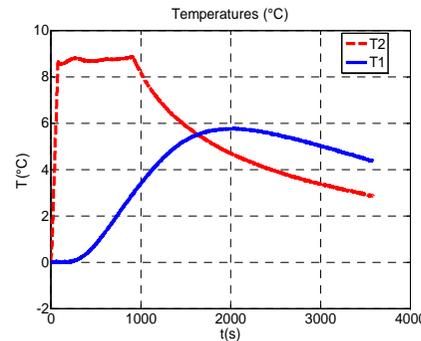
$$T_{2_{mod}}(t) = T_{1_{exp}}(t) \otimes F(t, \lambda, a, \lambda)$$

PEUT-ON MESURER λ^* AVEC UN MODÈLE REDUIT « THERMIQUE » ?

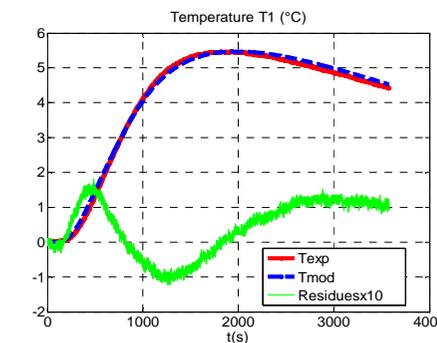
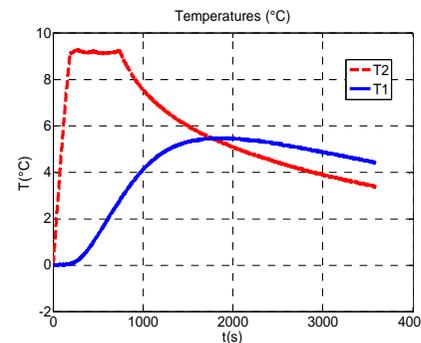
Méthode du Tricouche cylindrique : Résultats expérimentaux

Liège sec :

$$\lambda = 0,038 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$
$$\rho c = 111300 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$$



Liège humide (3%)



Conclusions

- Pas de mesure fiable de λ^* en transitoire avec un simple modèle réduit à la thermique pour des matériaux isolants humides
- L'équation $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right]$ ne permet pas de représenter les évolutions de température, il faut a priori tenir compte des transferts de masse .

PEUT-ON MESURER λ EN TRANSITOIRE AVEC UN MODÈLE COMPLET?

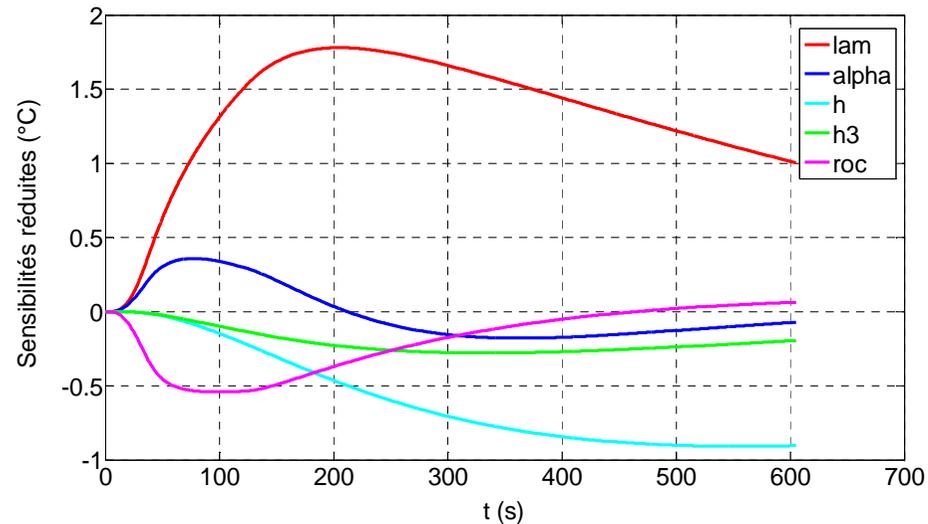
Méthode du Tricouche plan

- Paramètres à estimer : λ , ρc , α (diffusion massique) et h
- Pas de solution analytique → résolution numérique
- Nécessité de connaître les isothermes de sorption $X = f(HR, T)$
- Hypothèses :
 - Simple diffusion dans le matériau (pas toujours le cas)
 - Pas de diffusion liquide

PEUT-ON MESURER λ EN TRANSITOIRE AVEC UN MODÈLE COMPLET?

Méthode du Tricouche plan

Etude des sensibilités réduites

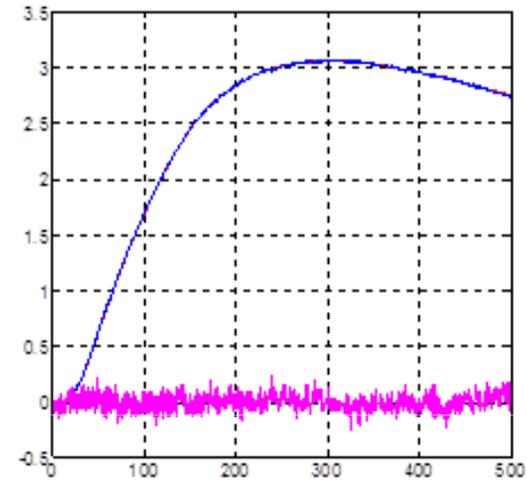
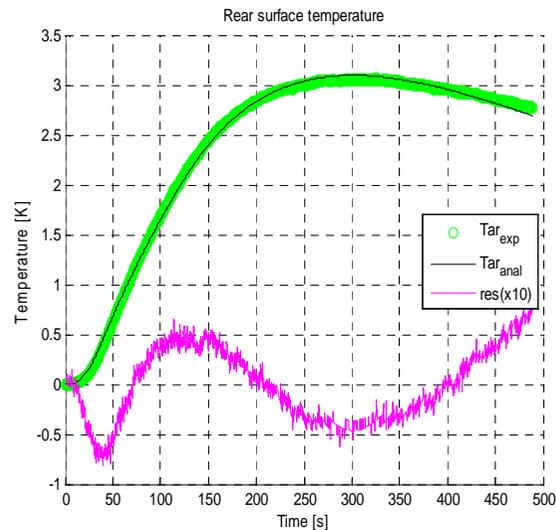


Pour le cas étudié :

- Sensibilités à ρc et à α corrélées : nécessité de mesurer ρc par ailleurs (DSC)
- Sensibilités à λ et à h_3 faiblement décorrélées : estimation délicate

PEUT-ON MESURER λ EN TRANSITOIRE AVEC UN MODÈLE COMPLET?

Méthode du Tricouche plan



Courbes expérimentales et simulées et résidus d'estimation ($T = 30^{\circ}\text{C}$; $HR = 50\%$) :

- Avec le modèle thermique
- Avec le modèle couplé

PEUT-ON MESURER λ EN TRANSITOIRE AVEC UN MODÈLE COMPLET?

Exemple de résultats avec la méthode du Tricouche plan

HR (%)			5 °C	15 °C	30 °C	45 °C	Réf. 30 °C
20 %	λ	$Wm^{-1}K^{-1}$	0,0296	0,0297	0,0312	0,0327	0,0323
	α		-0,103	0,352	0,421	0,455	
	h	$Wm^{-2}K^{-1}$	4,05	4,09	4,60	5,22	
50 %	λ	$Wm^{-1}K^{-1}$	0,0265	0,0256	0,0246	0,0244	0,0330
	α		0,692	0,623	0,527	0,365	
	h	$Wm^{-2}K^{-1}$	3,25	3,16	2,78	2,29	
80 %	λ	$Wm^{-1}K^{-1}$	0,0216	0,0241	0,0313	0,0356	0,0337
	α		1,09	0,728	3,96	0,326	
	h	$Wm^{-2}K^{-1}$	3,17	3,72	3,96	4,45	

Amélioration des résultats si l'on fixe h , mais justification de la valeur choisie ?

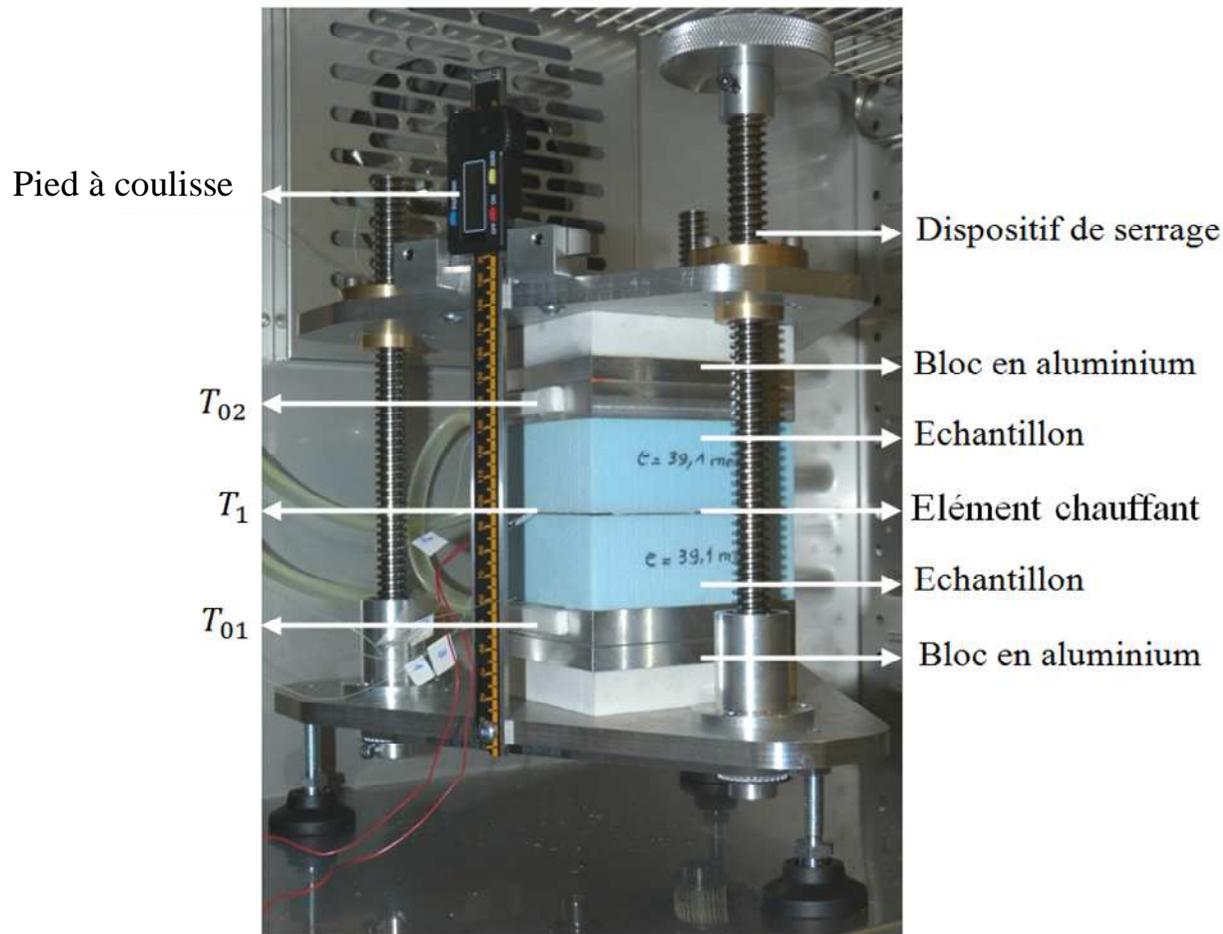
Conclusion :

Beaucoup d'efforts pour un résultat plus qu'incertain !

MESURE DE λ EN REGIME PERMANENT

Utilisation d'une méthode de type plan chaud centré en régime permanent

Chambre climatique (T_a, HR_a) imposés



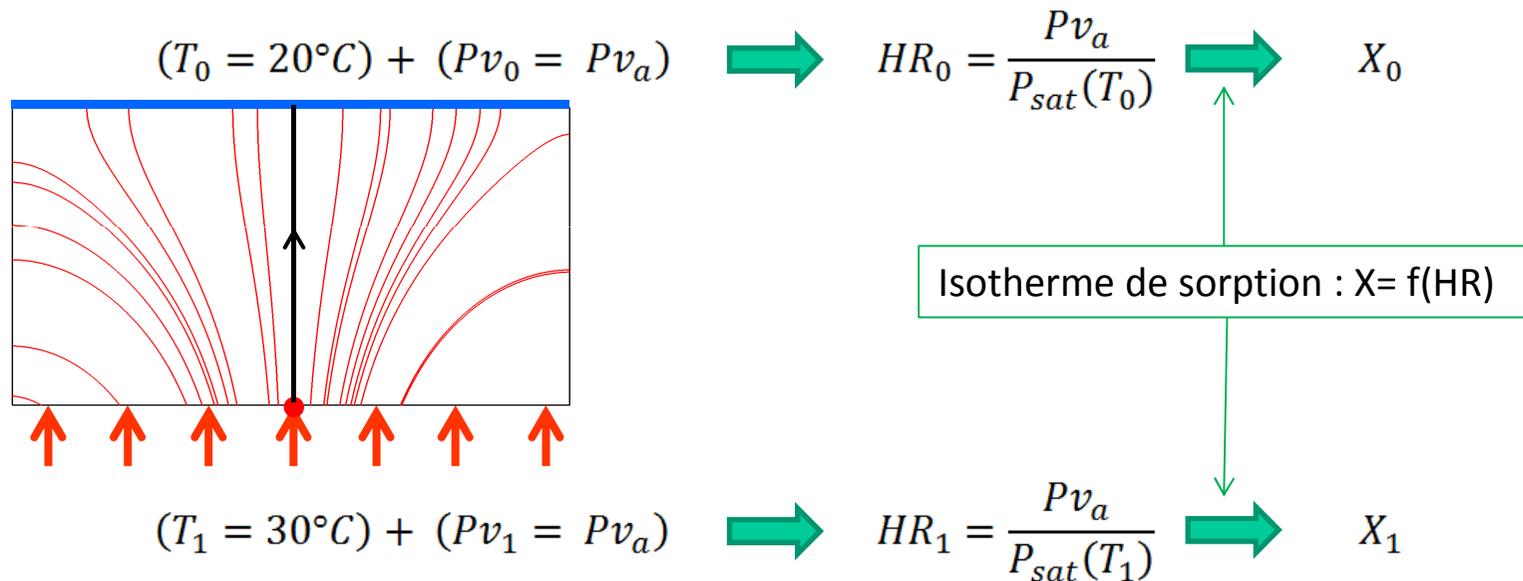
$$\lambda = \frac{R_{el}}{S} I^2 \frac{1}{\frac{\Delta T_1}{e_1} + \frac{\Delta T_2}{e_2}}$$

MESURE DE λ EN REGIME PERMANENT

Que mesure-t-on exactement ?

Chambre climatique : (T_a, HR_a) imposés $\Rightarrow p_{va}$ imposé

A l'équilibre, $p_v = p_{va}$ en tout point de l'échantillon

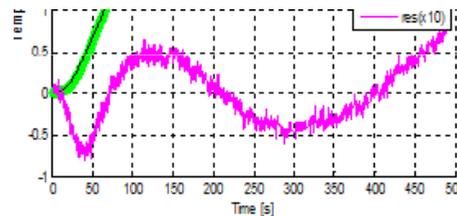


Mesure de λ d'un échantillon à l'équilibre avec un air à $T = \frac{T_0 + T_1}{2}$ et $HR = \frac{HR_0 + HR_1}{2}$

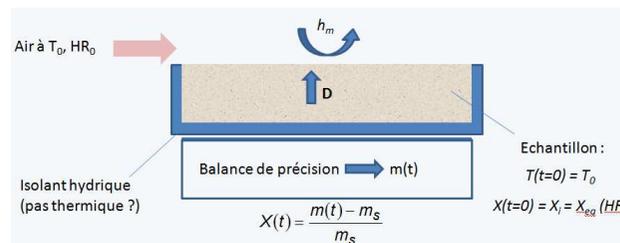
de teneur en eau $X = \frac{X_0 + X_1}{2}$ (si l'on connaît l'isotherme de sorption)

CONCLUSIONS ?

- Les transferts couplés chaleur-masse ne peuvent pas toujours être représentés par un modèle réduit à la thermique même avec des propriétés « modifiées » (λ^* au lieu de λ par exemple)
- Modèle réduit « thermique » acceptable pour les matériaux moyennement conducteurs mais pas pour les isolants
- En caractérisation thermique transitoire, l'influence de la présence d'eau se détecte par des résidus signés caractéristiques :



- Mesurer λ en régime permanent dans une enceinte climatique : T_a et HR_a imposés
- Mesurer α (diffusivité massique) par une expérience de séchage exploitant la perte de masse au cours du temps



Merci pour votre attention