

METROLOGIE THERMIQUE ADAPTEE AUX ISOLANTS ET SUPER-ISOLANTS LEGERS: APPLICATION A LA THERMO-POROSIMETRIE

Alain DEGIOVANNI

Yves JANNOT



PLAN DE LA PRESENTATION

1. LES PRINCIPALES METHODES DE MESURE DE LA CONDUCTIVITE

2. PROBLEMES DE MESURE SUR DES MILIEUX POREUX SECS

Problèmes spécifiques aux milieux poreux légers

Une solution : La méthode du tricouche

Application à la porosimétrie

3. PROBLEME SPECIFIQUE LIE A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Présentation du cas d'étude : Plan chaud sur PAVASTEP

Mise en évidence de l'influence de l'humidité

Modélisation simplifiée

Validation expérimentale

MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Les modes de transferts internes

Conduction – convection – rayonnement – diffusion de masse – transfert de masse

FOURIER

$$\varphi_c = -\lambda \text{ grad } T$$

Conséquences

Solide

Opaque


Homogène (ou homogénéisable)

(pas forcément isotrope)

MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

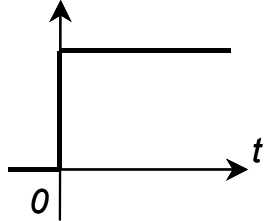
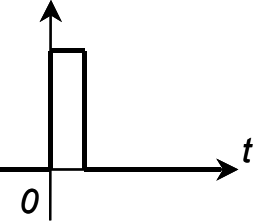
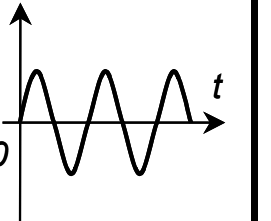
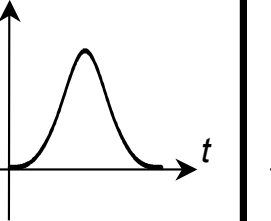
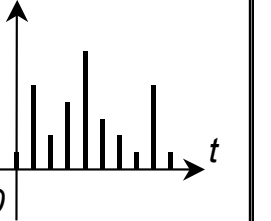
Les principales méthodes

* Régime permanent  λ

* Régimes variables  λ
 $\lambda / \rho c$
 $\sqrt{\lambda \rho c}$
 ρc

MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Les principales méthodes instationnaires

Mesures \ Perturbations	Echelon			Dirac			Périodique			Quelconque			Aléatoire				
																	
I				A					B					R			
II		C		D		E,F			G					S			
III	H								I	J		K,W	L,M				
IV	N,X,Y	O	P	Q													
V				T	U	V											
Géométrie	1a	2a	3a	1a	1b	1c	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a	1a	2a	3a

Mesure

- I – 1 température sur la perturbation
- II – 1 température hors de la perturbation
- III – 2 températures
- IV – 1 flux et 1 température
- V – n températures (caméra infrarouge)

Géométrie

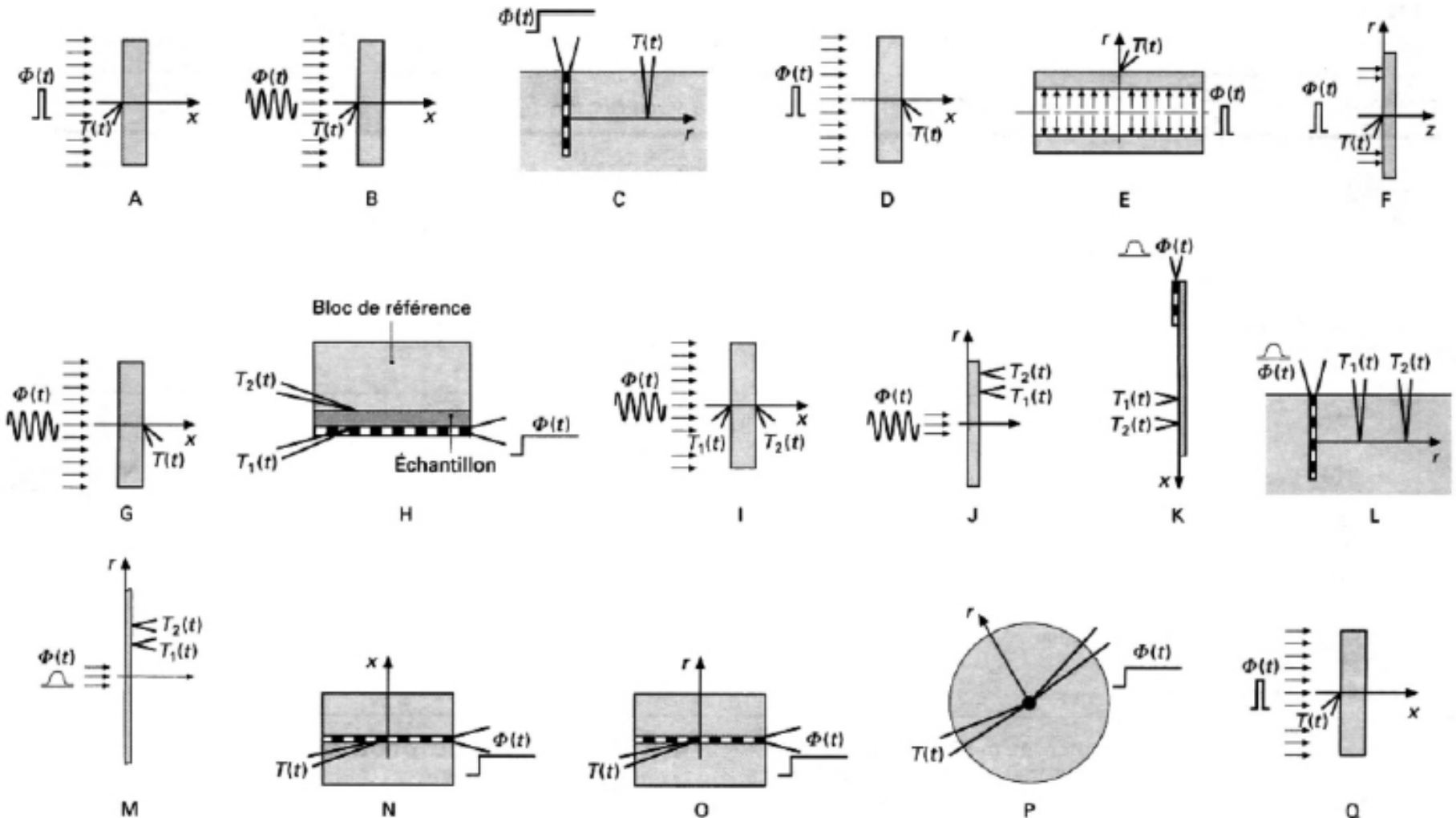
- 1 – "mur"
- 2 – "cylindre"
- 3 – "sphère"

Perturbation

- a – localisée en espace
- b – périodique en espace
- c – aléatoire en espace

MESURE DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE

Les principales méthodes instationnaires



PROBLEMES SPECIFIQUES AUX MILIEUX POREUX

Difficultés spécifiques aux milieux poreux isolants légers

Méthodes à sondes (fil chaud, ruban chaud, plan chaud) inadaptées :

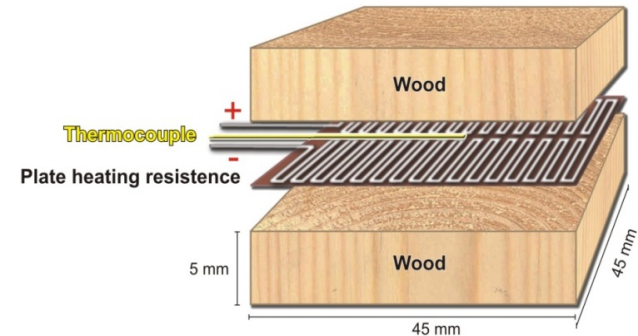
- masse sonde \approx masse échantillon

Méthodes Flash :

- absorption du flash pas seulement en surface

Mesure de température de surface :

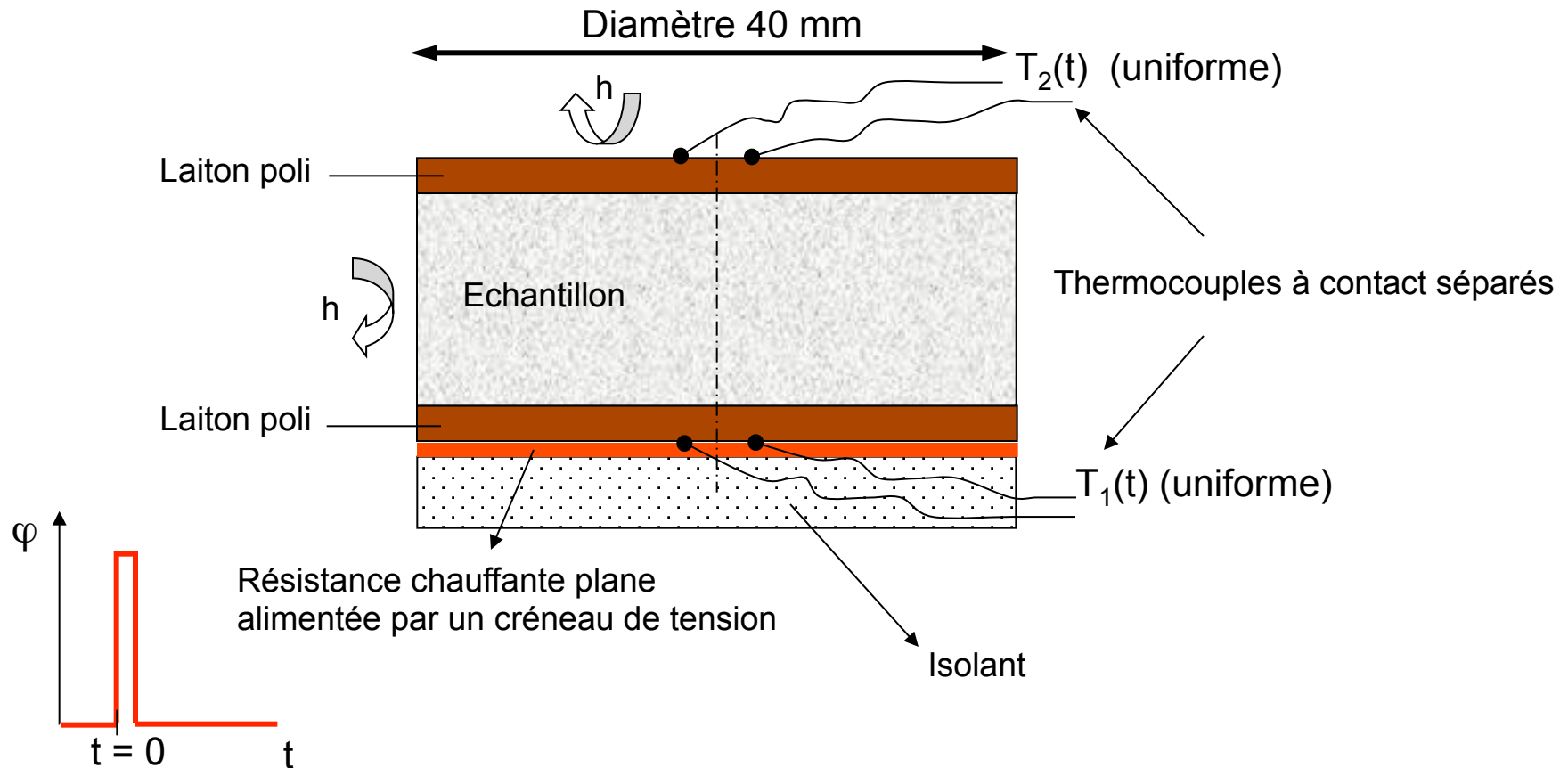
- impossible par contact
- mesure optique biaisée : rayonnement émis pas seulement par la surface



Mise au point d'une méthode adaptée

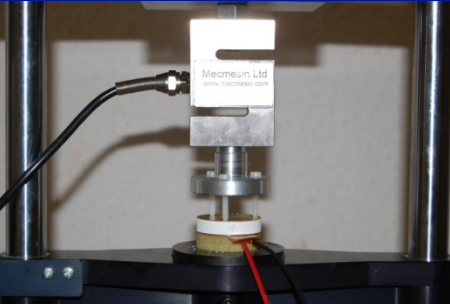
LA METHODE DU TRICOUCHE

Méthode transitoire : estimation de λ et ρc



Approche classique : $T_1(t)$ ou $T_2(t) = f [t, \varphi(t), \lambda_{\text{isolant}}, \rho c_{\text{isolant}}, \lambda, \rho c, h]$

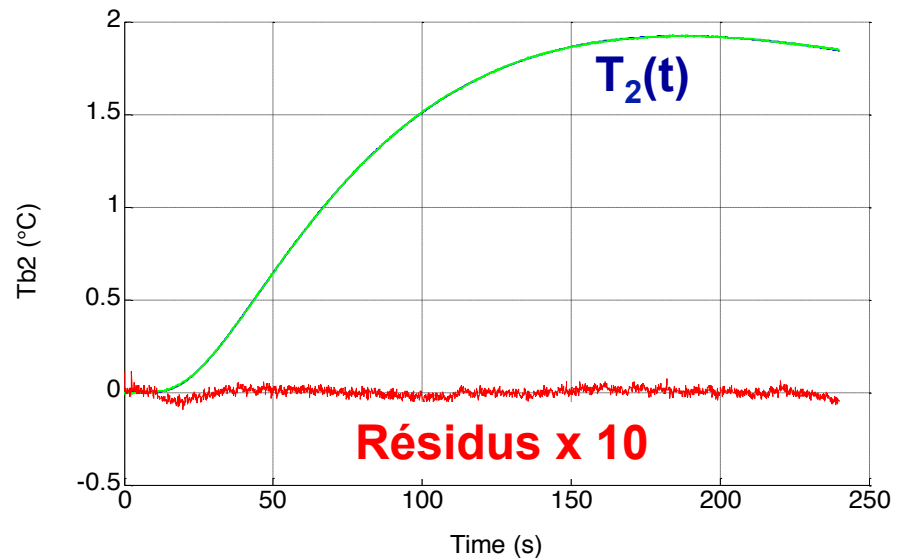
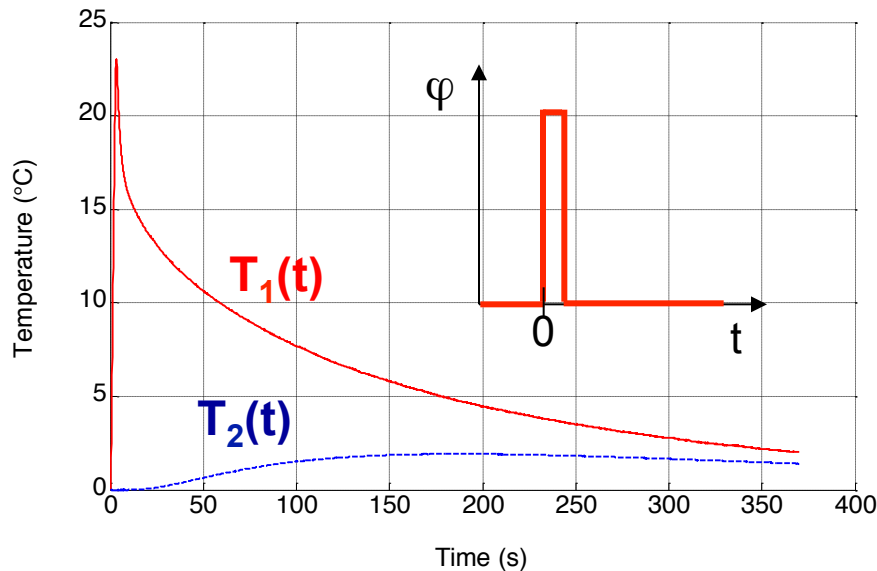
LA METHODE DU TRICOUCHE



Principe de la méthode

~~$$T_{2\text{mod}}(t) = f [t, \varphi(t), \lambda_{\text{isolant}}, \rho c_{\text{isolant}}, \lambda, \rho c, h]$$~~

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

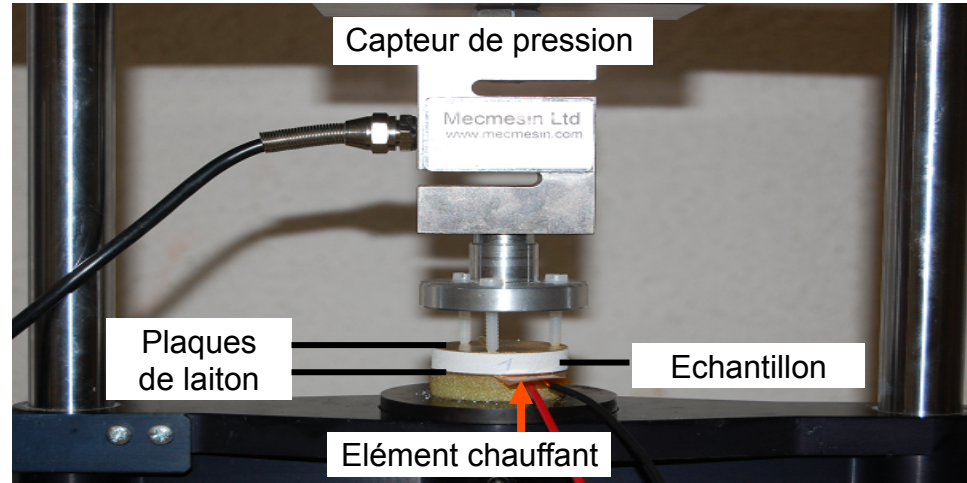


Estimation de λ , a et h minimisant $\sum [T_{2\text{mod}}(t_i) - T_{2\text{exp}}(t_i)]^2$

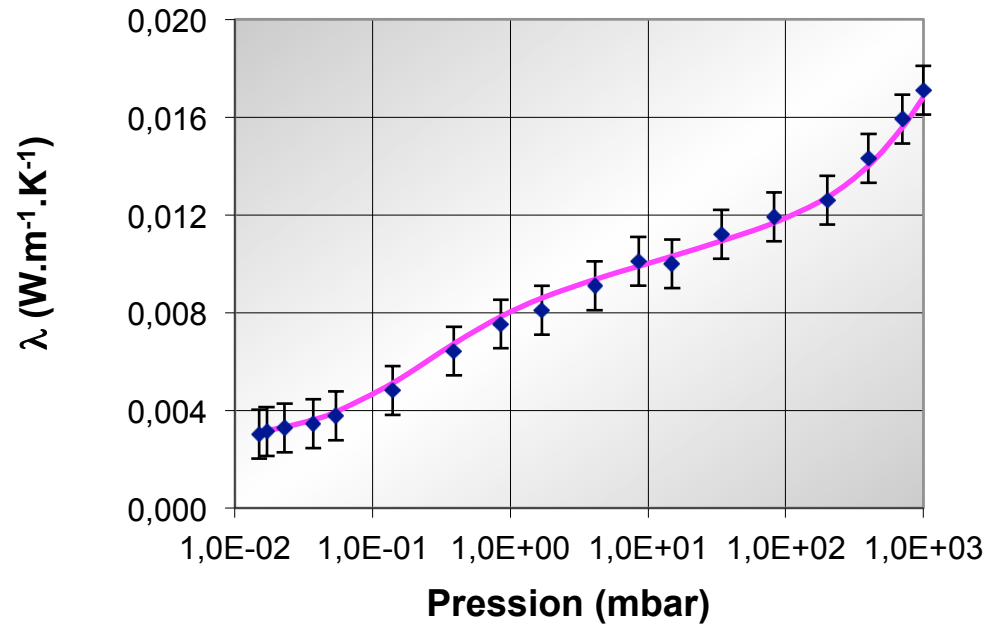
METHODE DU TRICOUCHE



Dispositif expérimental

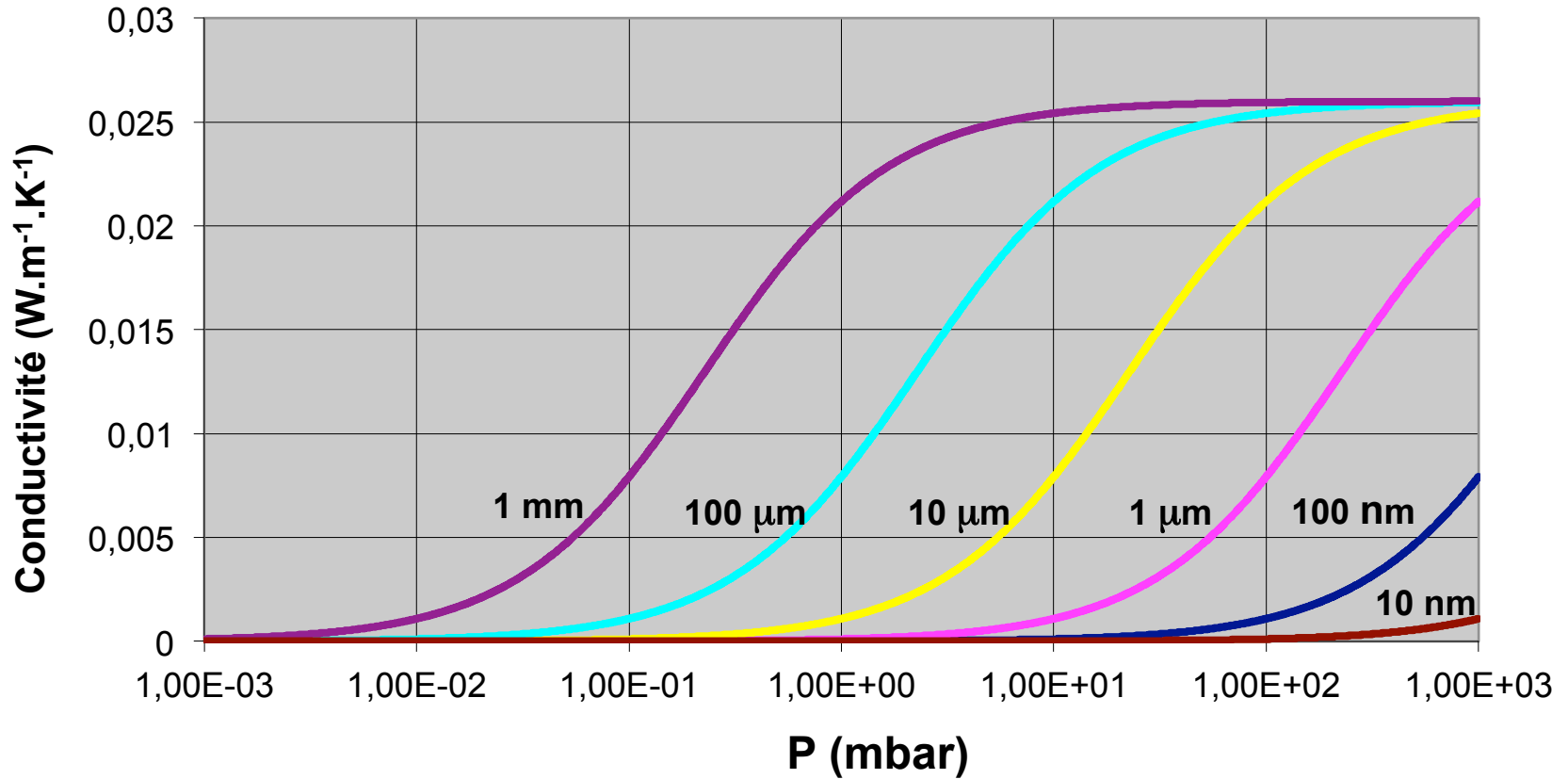


Aérogel de silice : SPACELOFT



LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DE L'AIR

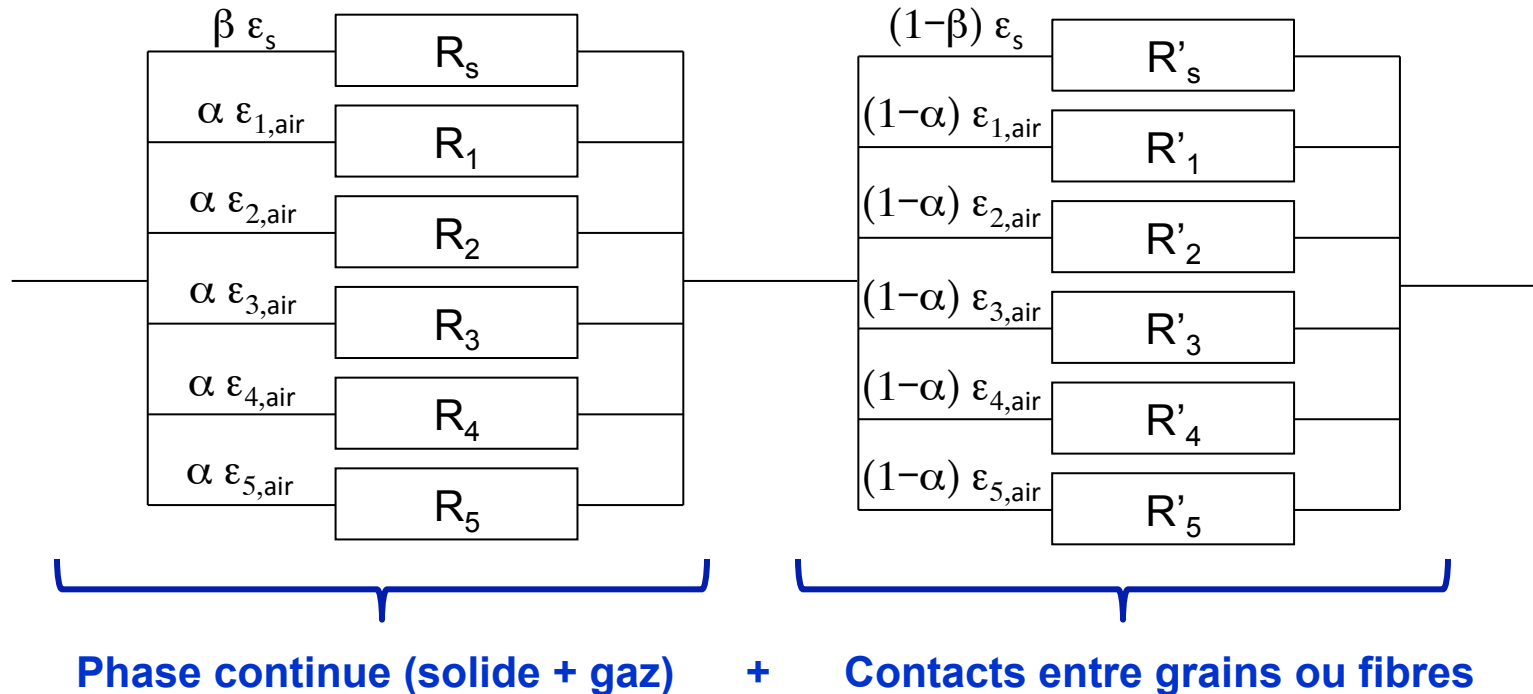
$$\lambda_{\text{air}} = f(\text{Pression}, D_{\text{pores}})$$



Estimation de la porosité relative à 5 tailles de pores

MODELE DE CONDUCTIVITE D'UN MILIEU POREUX

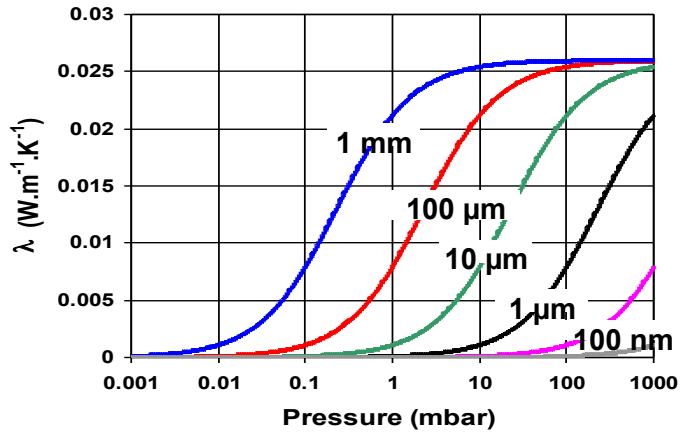
Modèle parallèle-série-parallèle



$$\lambda_{\text{atm}} - \lambda_{\text{vide}} > 0,026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad \text{possible}$$

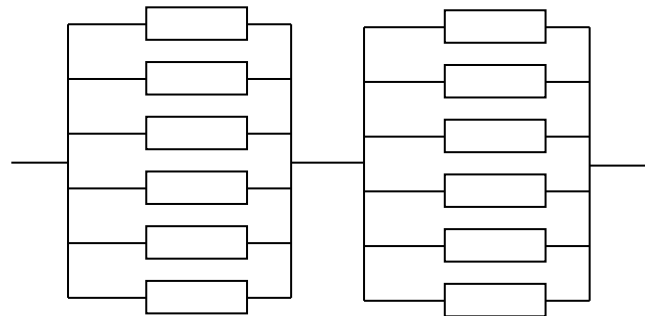
$$\lambda_{\text{vide}} \neq 0$$

APPLICATION : POROSIMETRIE THERMIQUE

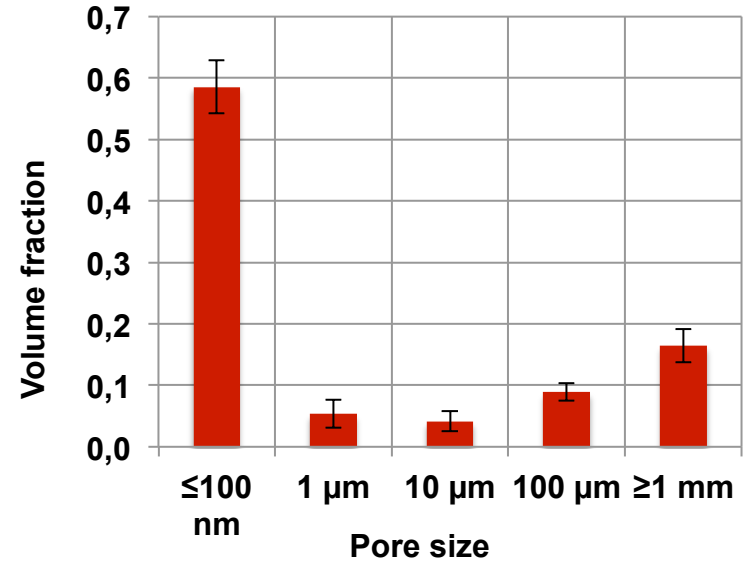
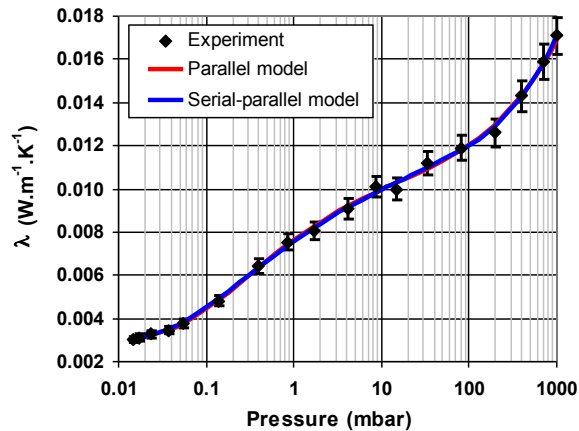


λ_{air}

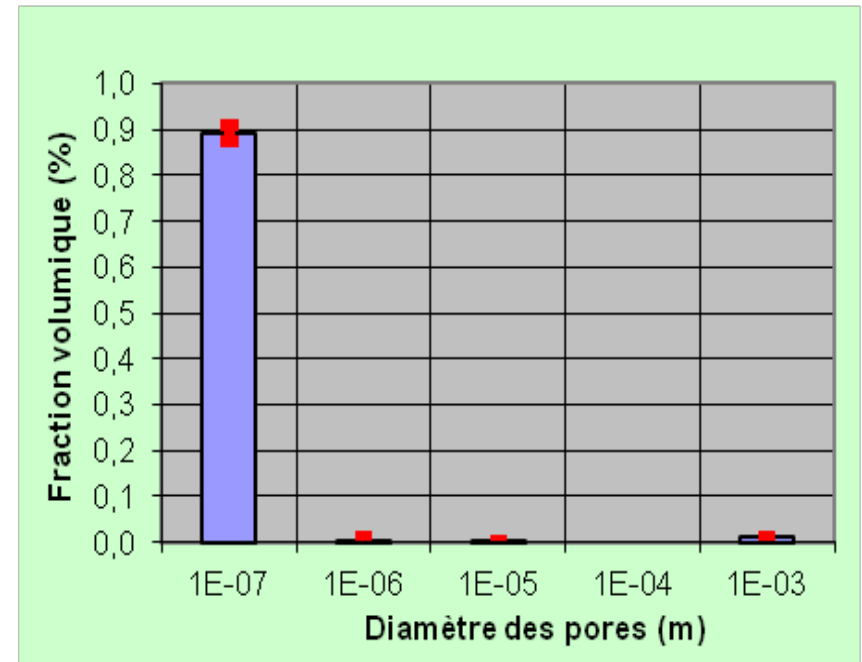
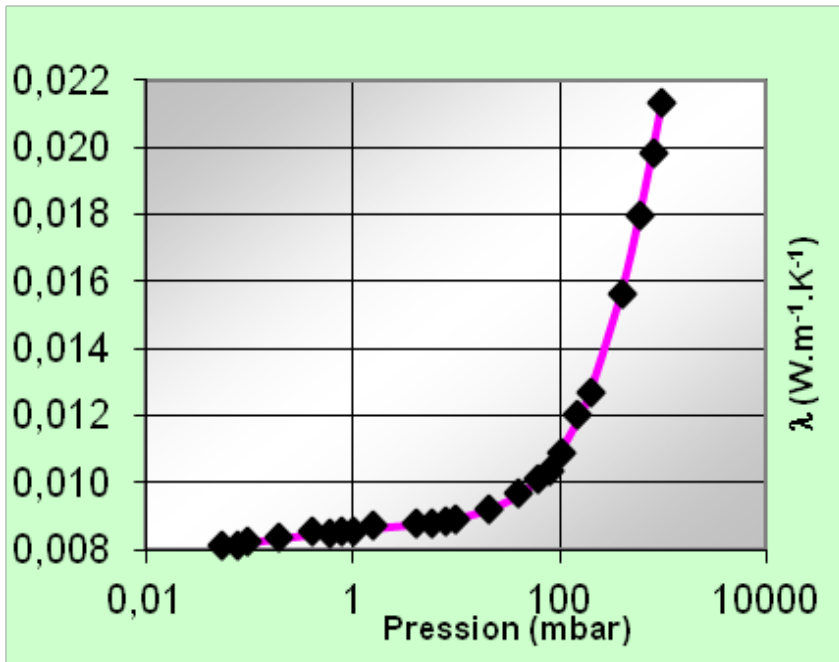
Modèle
 λ_{eq}



$\lambda_{exp} = f(P_{air})$

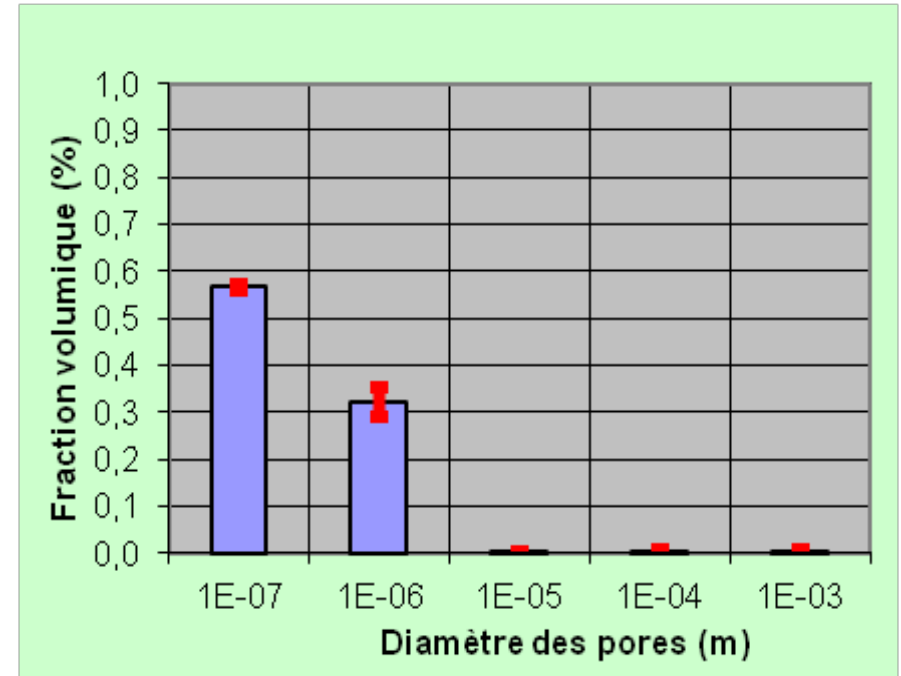
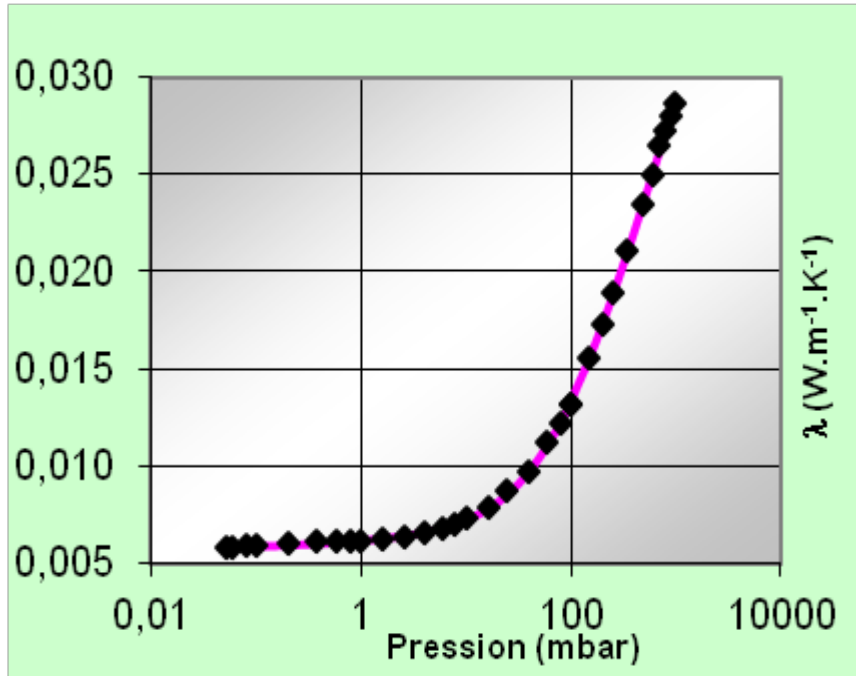


APPLICATION : POROSIMETRIE THERMIQUE



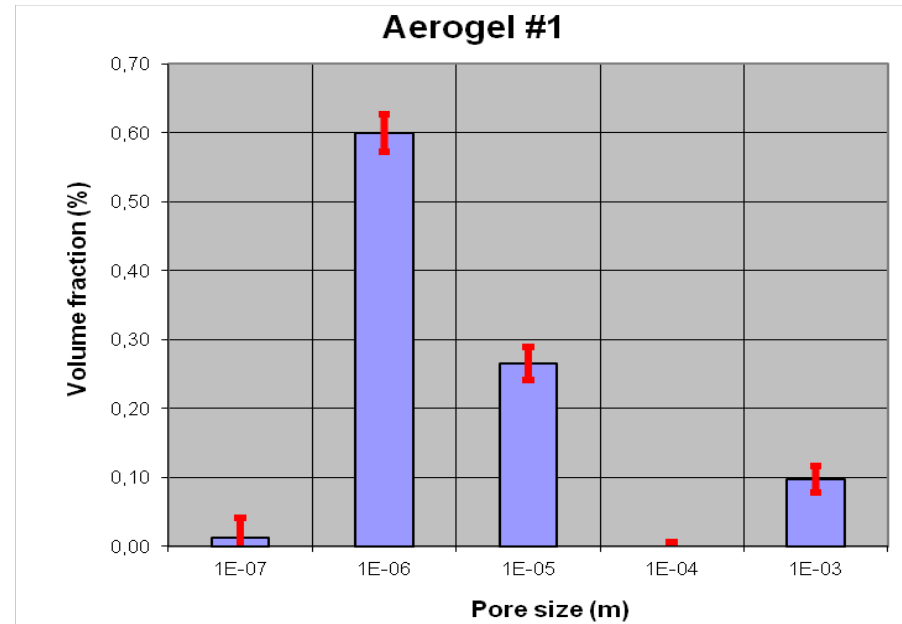
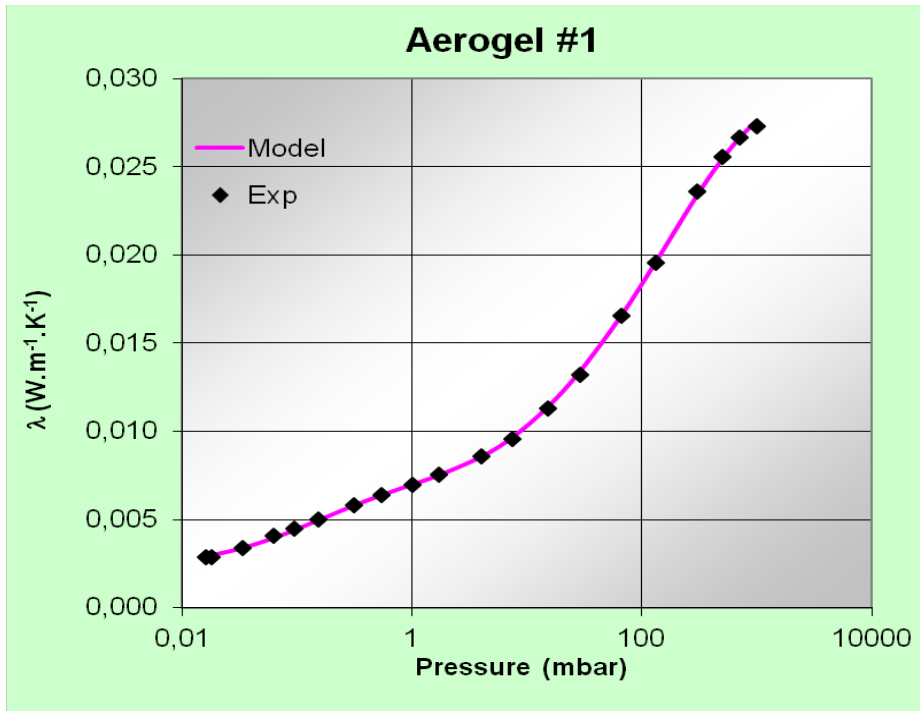
1^{er} exemple: comparaison modèle – mesure ; répartition des pores

APPLICATION : POROSIMETRIE THERMIQUE



2^{ème} exemple: comparaison modèle-mesure ; répartition des pores

APPLICATION : POROSIMETRIE THERMIQUE



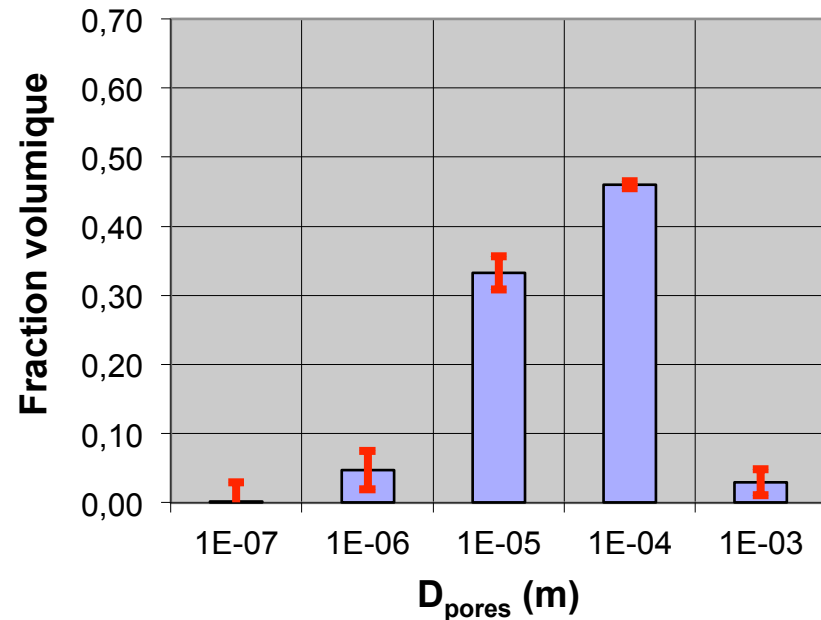
3^{ème} exemple: comparaison modèle-mesure ; répartition des pores

PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Objet d'étude : Panneau à base de fibres de bois PAVASTEP

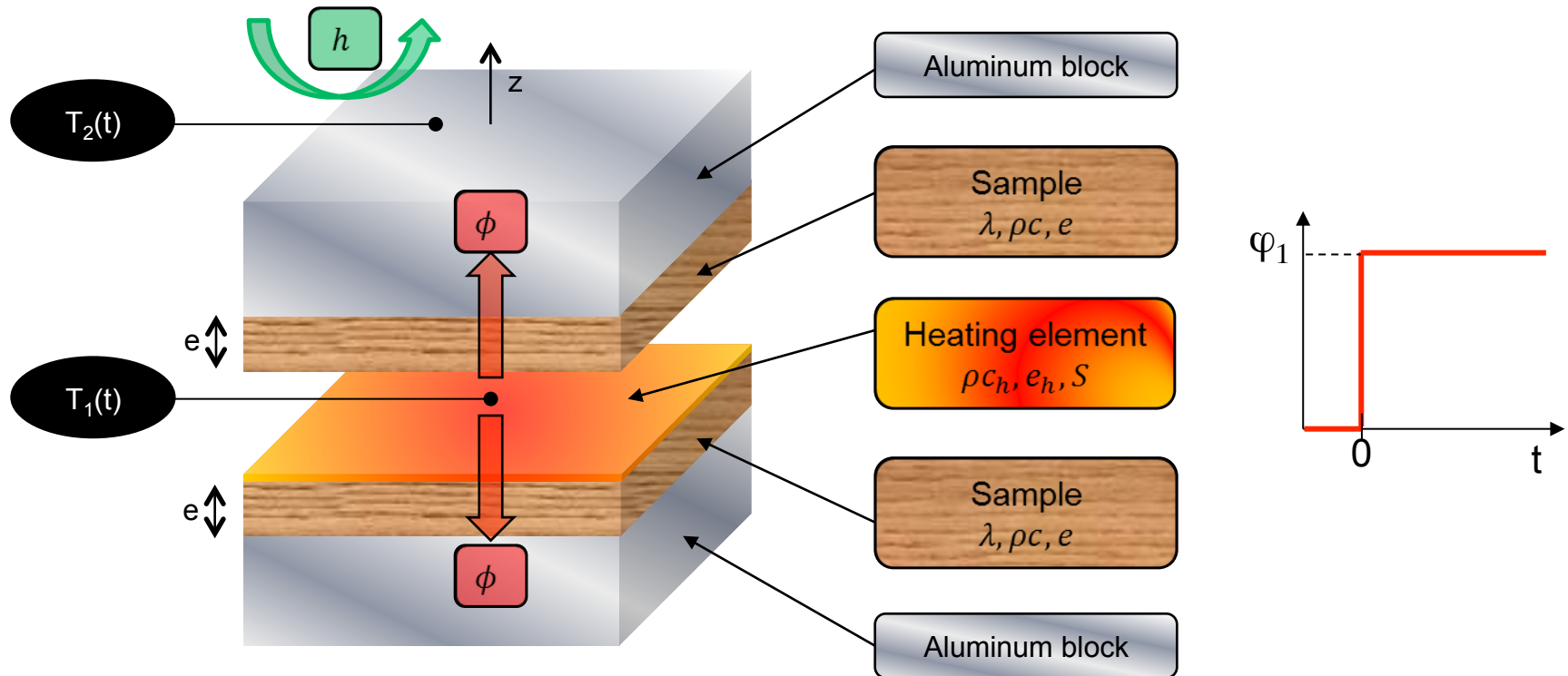
Isolant « lourd » très poreux :

Propriétés du matériau sec : $\lambda \approx 0,05 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$; $\rho \approx 210 \text{ kg.m}^{-3}$; $\varepsilon = 0,87$



PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Méthode d'étude : Plan chaud centré



PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Méthode d'étude : Plan chaud centré

- Hypothèses :
- $T_1(t=0) = 0$
 - Transfert 1D au centre
 - $T_2(t) = 0$
 - R_{contact} négligeables

Modélisation quadripolaire :
$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \frac{\phi_1}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ C_h p & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \Phi_2 \end{bmatrix}$$
 Avec : $\theta_1(p) = L[T_1(t)]$
 $C_h = (\rho c e)_h$

$$\theta_0(p) = \frac{\phi_1}{p} \frac{B_1}{B_1 C_h p + D_1}$$

Avec : $D_1 = \cosh\left(\sqrt{\frac{p}{a_1}} e_1\right)$ $B_1 = \frac{\sinh\left(\sqrt{\frac{p}{a_1}} e_1\right)}{\lambda_1 \sqrt{\frac{p}{a_1}}}$

Estimation en régime permanent :

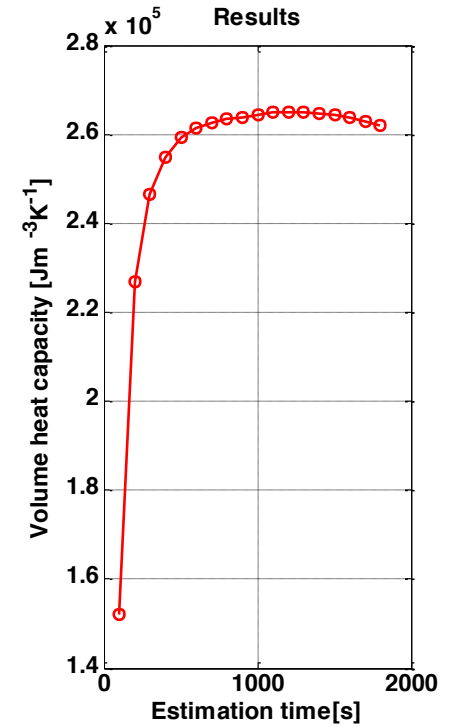
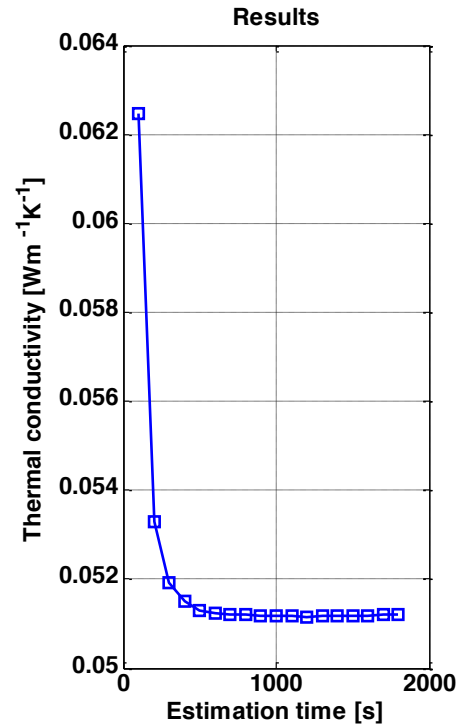
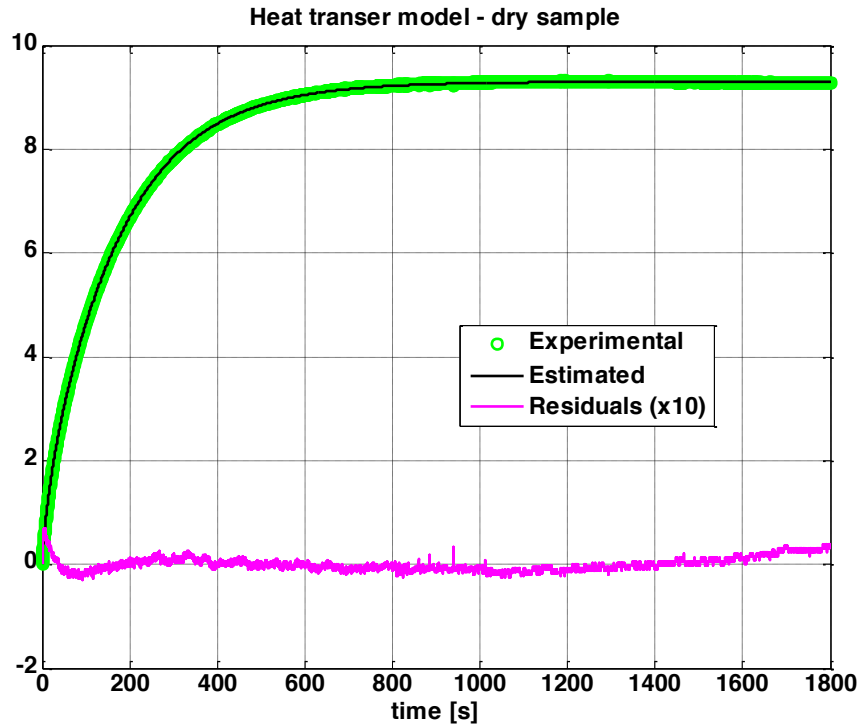
$$\lambda = \frac{e \phi_1}{T_1(t = \infty)}$$

Estimation en régime transitoire :

$\lambda, \rho c, \rho c_h$ estimés par minimisation des écarts quadratiques entre $T_{1\text{exp}}()$ et $T_{1\text{mod}}(t)$

PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Validation de la méthode sur échantillon sec



$$\lambda_{\text{sec}} = 0,0512 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$$

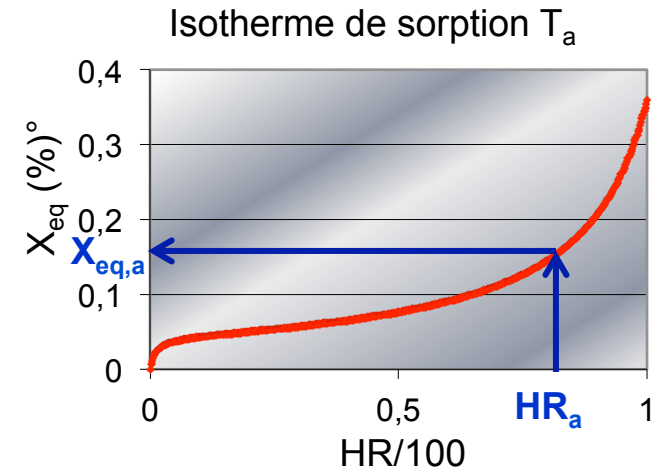
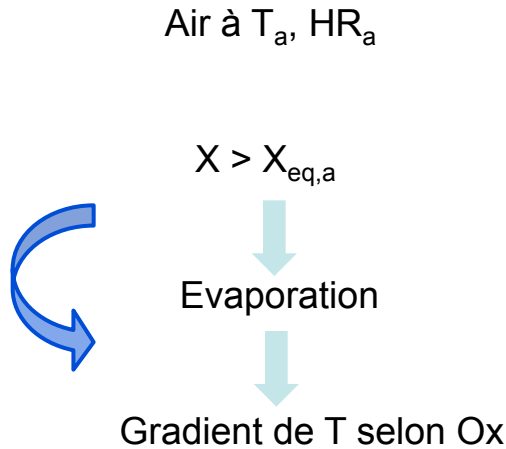
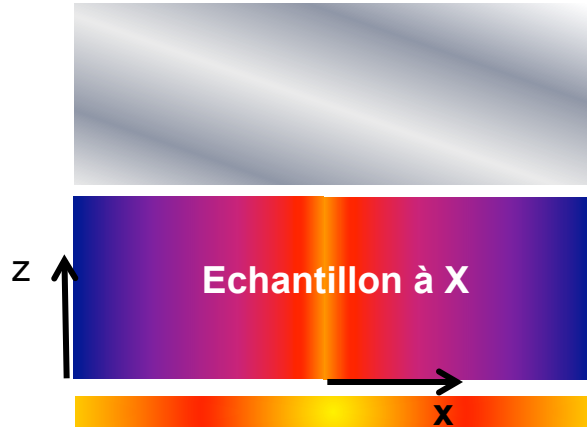
Valeur fabricant : $\lambda_{\text{sec}} = 0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, écart = 2,4%

$$\rho c_{\text{sec}} = 265000 \text{ J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$$

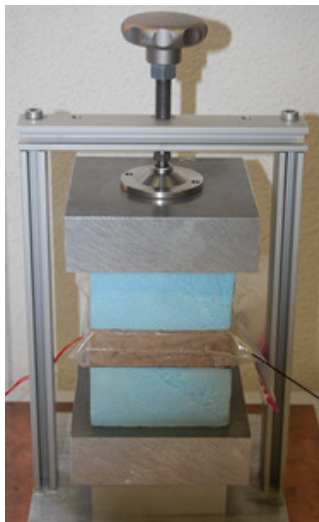
$$\text{DSC} : \rho_{\text{sec}} = 1214 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} + r = 210 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$$

PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Comment satisfaire la condition $T_1(t=0) = 0$?



Solution : « ensacher » l'échantillon



Sachet Polyéthylène mince étanche

Air à HR imposé par X, (tel que $X_{eq} (HR) = X$)

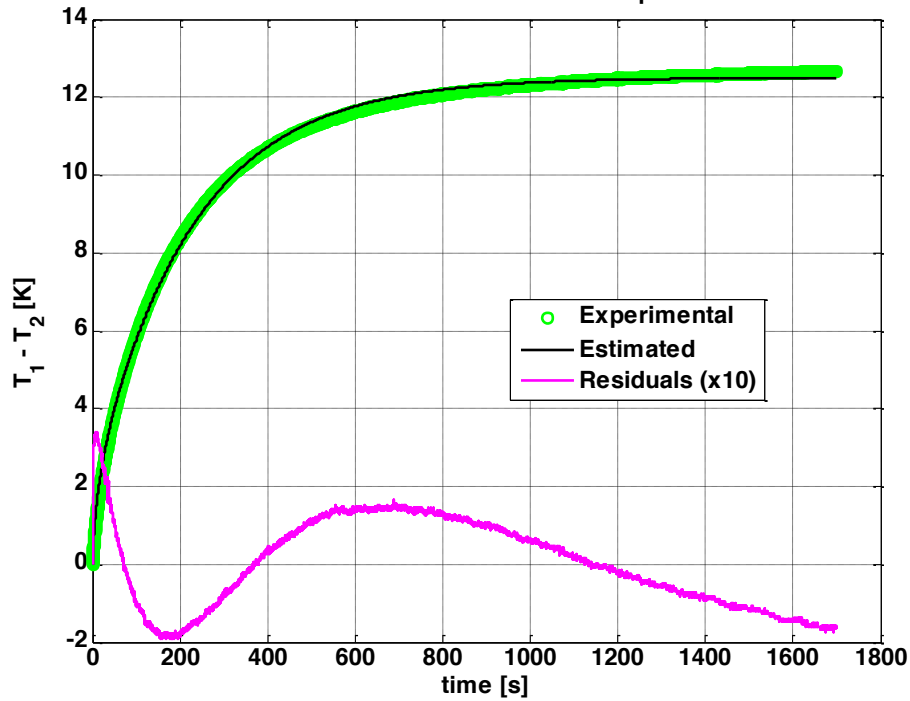
Pas d'évaporation → Pas de gradient de température

PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

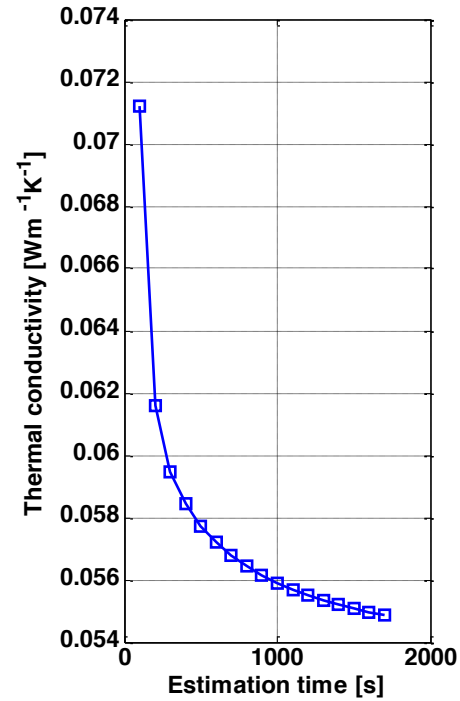
Mise en évidence des problèmes liés à la présence d'humidité

Pavastep de teneur en eau base sèche = 6%

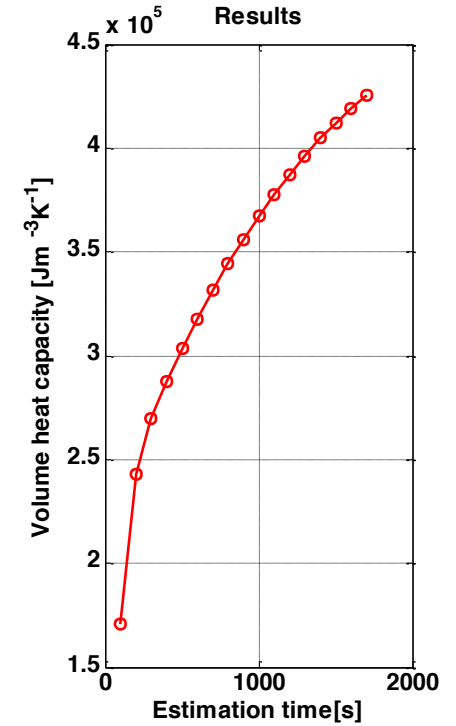
Heat transer model - wet sample



Results



Results



PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Modèle 1D de transferts couplés chaleur / masse :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\rho_{\text{sec}}}{\rho c} \Delta H_v \frac{\partial X}{\partial t} \qquad \frac{\partial X}{\partial t} = D_m \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} + \delta D_m \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

Conditions limites en $z = 0$:

$$\phi = \rho c_h \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \qquad -D_m \left(\frac{\partial X}{\partial z} + \delta \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

Conditions limites en $z = e$:

$$T(e, t) = T_\infty \qquad -D_m \left(\frac{\partial X}{\partial z} + \delta \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0$$

Condition initiale à $t = 0$:

$$T(z, 0) = T_\infty \qquad X(z, 0) = X_i$$

➤ Résolution numérique par volumes finis

$$T(t, z, \lambda, \rho c, \delta, D_m, \rho c_h)$$

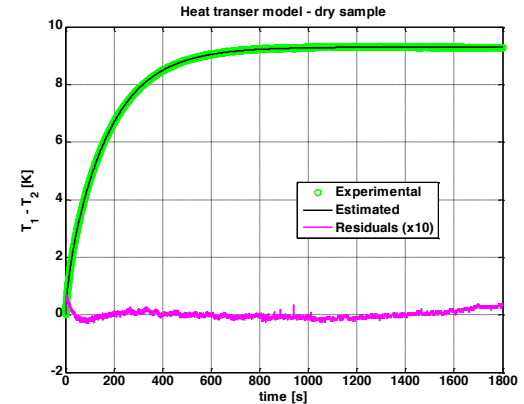
PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Méthode d'estimation

1. Essai sur échantillon sec



Estimation de λ_{sec} , ρc_{sec} et ρc_h

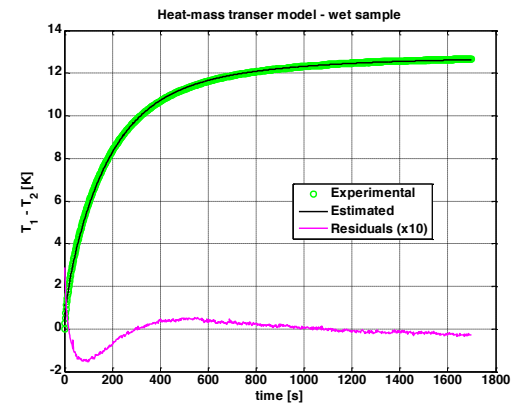


2. Essai sur échantillon de teneur en eau X

ρc_h et $(\rho c)_X = (\rho c)_{\text{sec}} \left(1 + X \frac{c_{\text{eau}}}{c_{\text{sec}}} \right)$ supposés connus



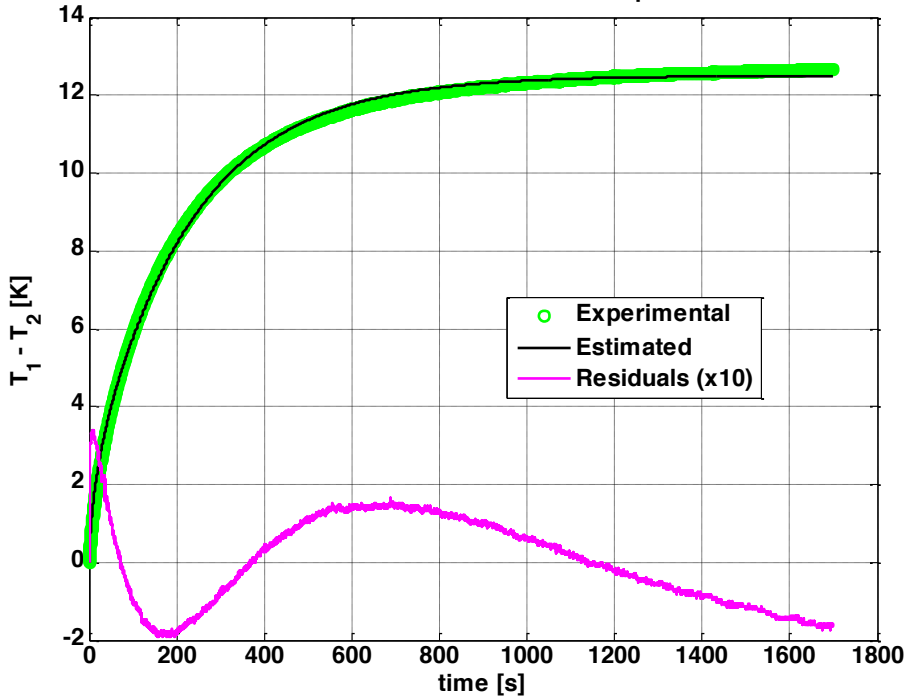
Estimation de $\lambda_{(X)}$, D_m et δ



PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

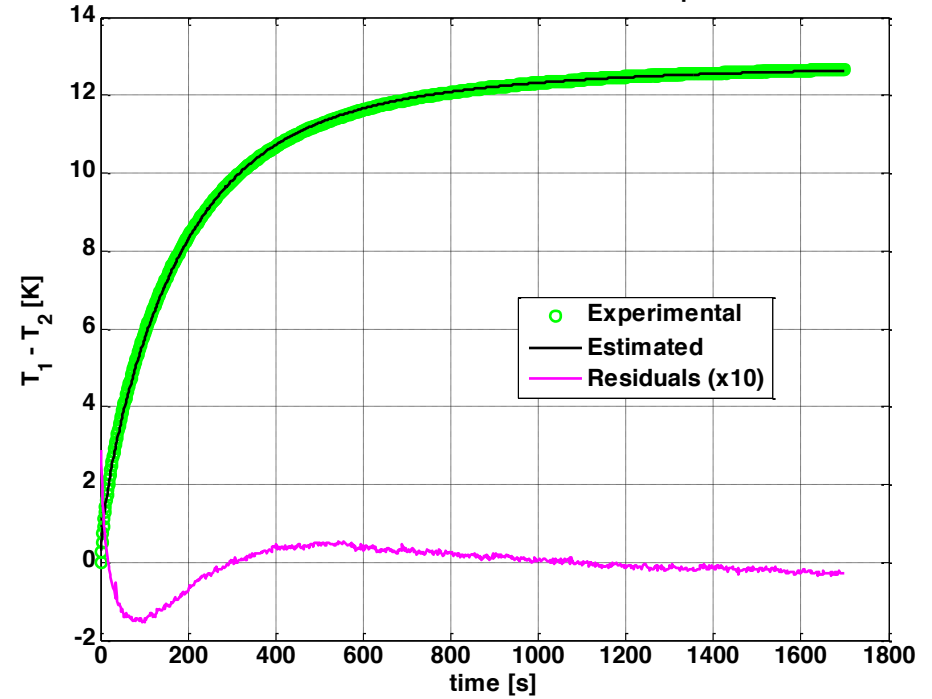
Le modèle de transferts couplés améliore les résidus

Heat transer model - wet sample



$$\lambda = 0.055 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

Heat-mass transer model - wet sample



$$\lambda = 0.0538 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$$

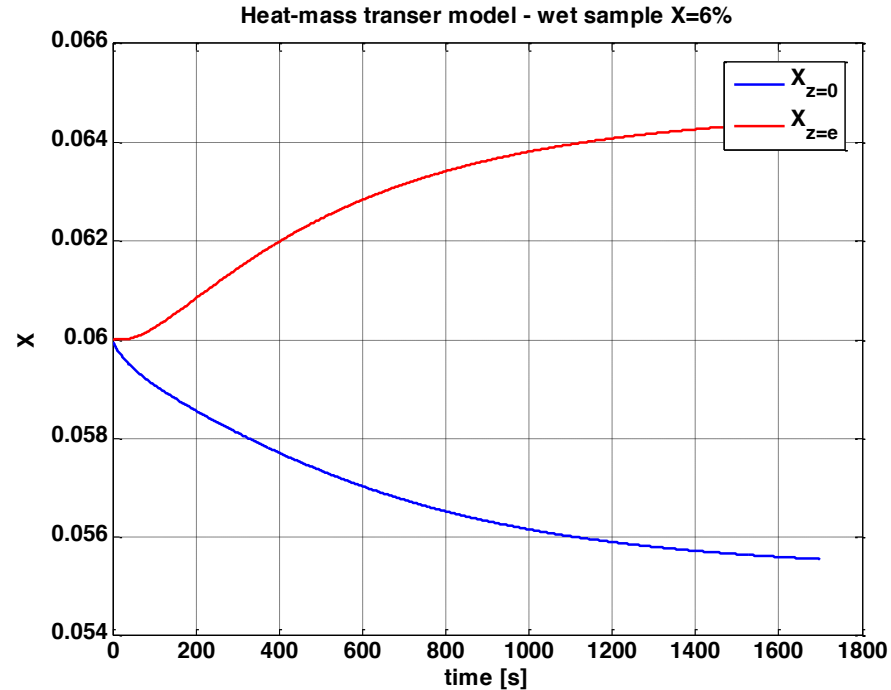
PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE

Résultats expérimentaux

Teneur en eau simulée sur les deux faces de l'échantillon

$$D_m = 1,43 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\delta = 6,6 \cdot 10^{-4}$$

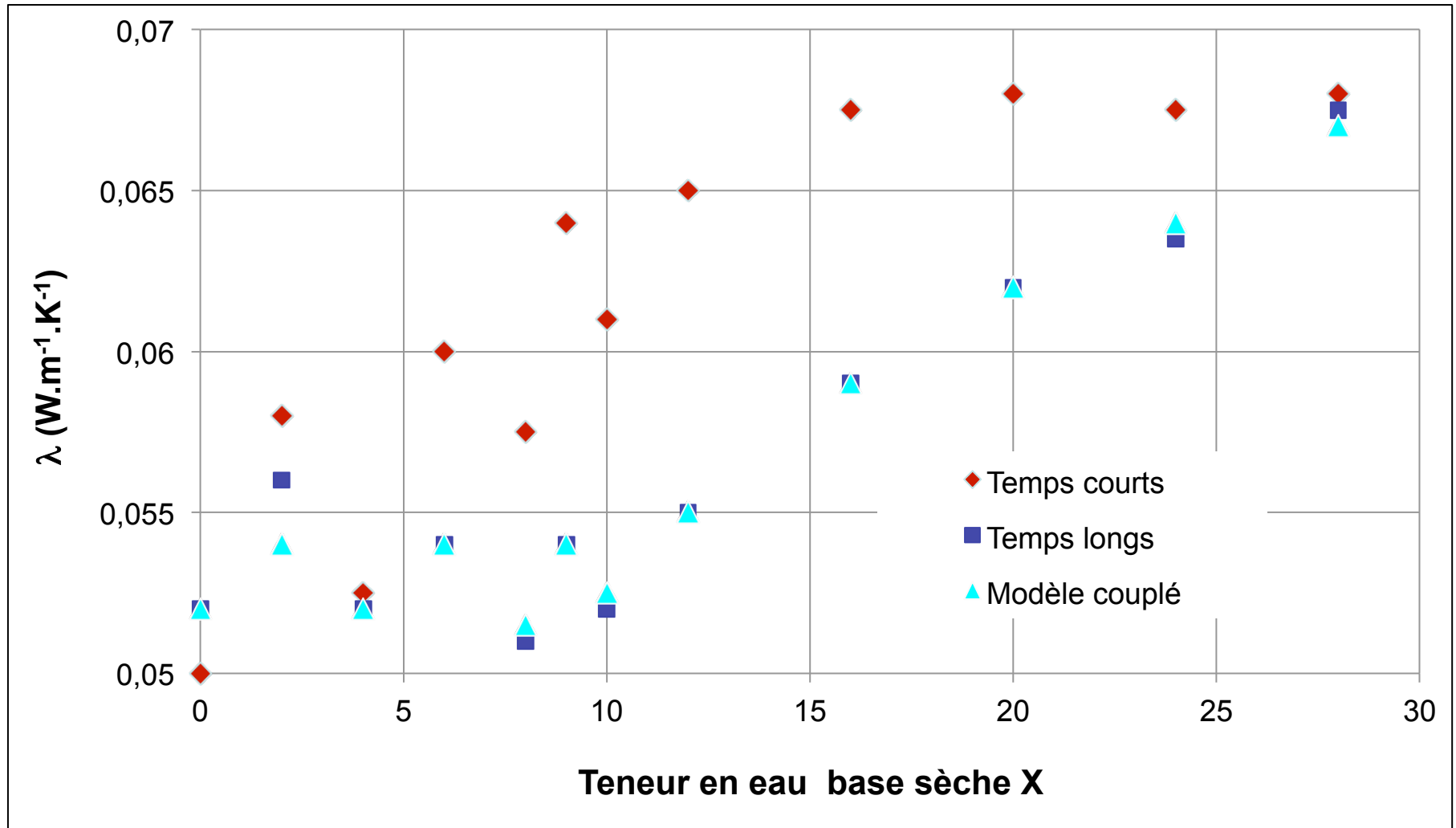


En l'absence de condensation, teneur en eau moyenne constante



Conductivité calculée en régime permanent \approx correcte

PROBLEMES LIES A LA PRESENCE D'HUMIDITE



CONCLUSIONS POUR LE PAVASTEP

➤ **Modèle thermique pur :**

Dispositif / conditions initiales et limites respectées

Résultats plus précis en régime permanent (« temps longs »)

Exploitation du début du régime transitoire à éviter

➤ **Utilisation d'un modèle simple de transferts couplés / transfert de chaleur pur**



Diminution des résidus

➤ **Résidus encore « signés » : modèle améliorable**

**MERCI DE VOTRE
ATTENTION**