

5^{ème} Ecole d'automne du GDR MBS

Eco-conception des matériaux biosourcés et géosourcés : de la ressource à la fin de vie

12 au 16 octobre 2025, Douai



Transferts thermiques

Didier DEFER didier.defer@univ-artois.fr



Laboratoire
de Génie Civil
et géo-Environnement



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



RÉPUBLIQUE
FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Caractérisation des propriétés thermiques des parois en matériaux biosourcés

- Les propriétés thermiques des matériaux biosourcés sont présentées comme un des atouts
- La caractérisation de leur propriétés thermiques sont au cœur des études que ce soit à l'échelle du matériau ou à l'échelle de parois en laboratoire ou in situ
 - Résistance et conductivité
 - Chaleur volumique
 - Déphasage
 - Amortissement



Equations de base

$$\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = a. \Delta T(x, y, z, t) \quad \text{équation de diffusion thermique}$$

$$\vec{q}(x, y, z, t) = -\lambda. \overrightarrow{\text{grad}} T(x, y, z, t) \quad \text{Loi de Fourier}$$

Quelques remarques :

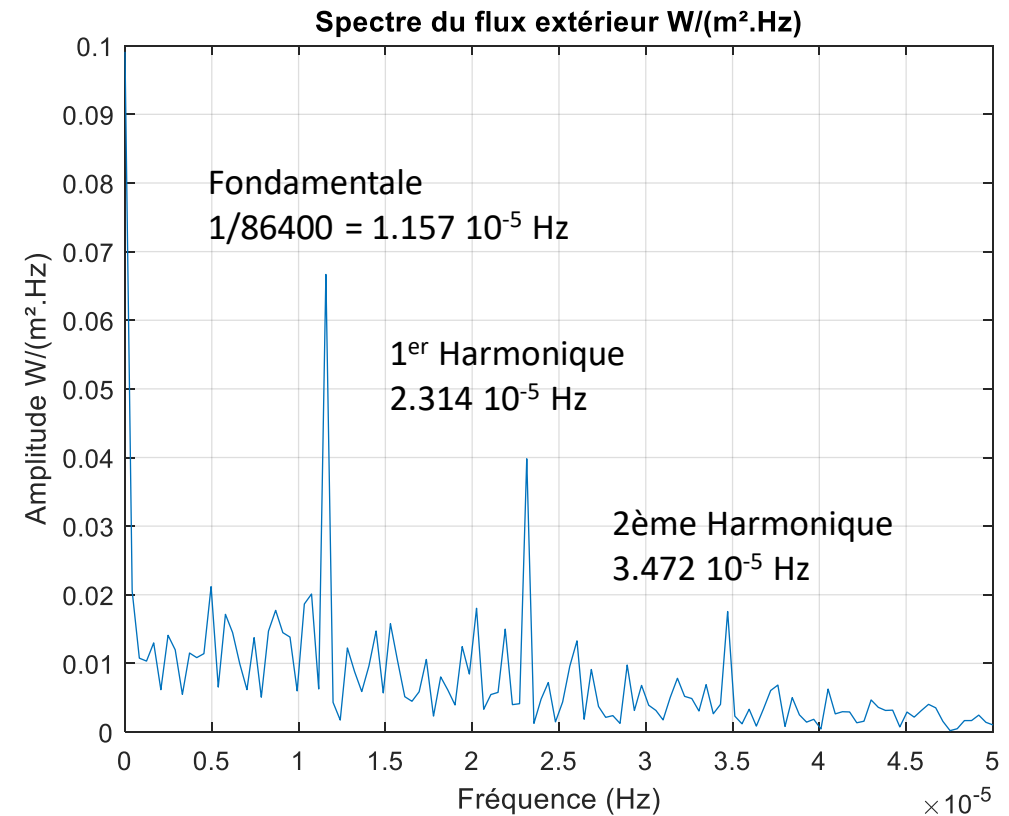
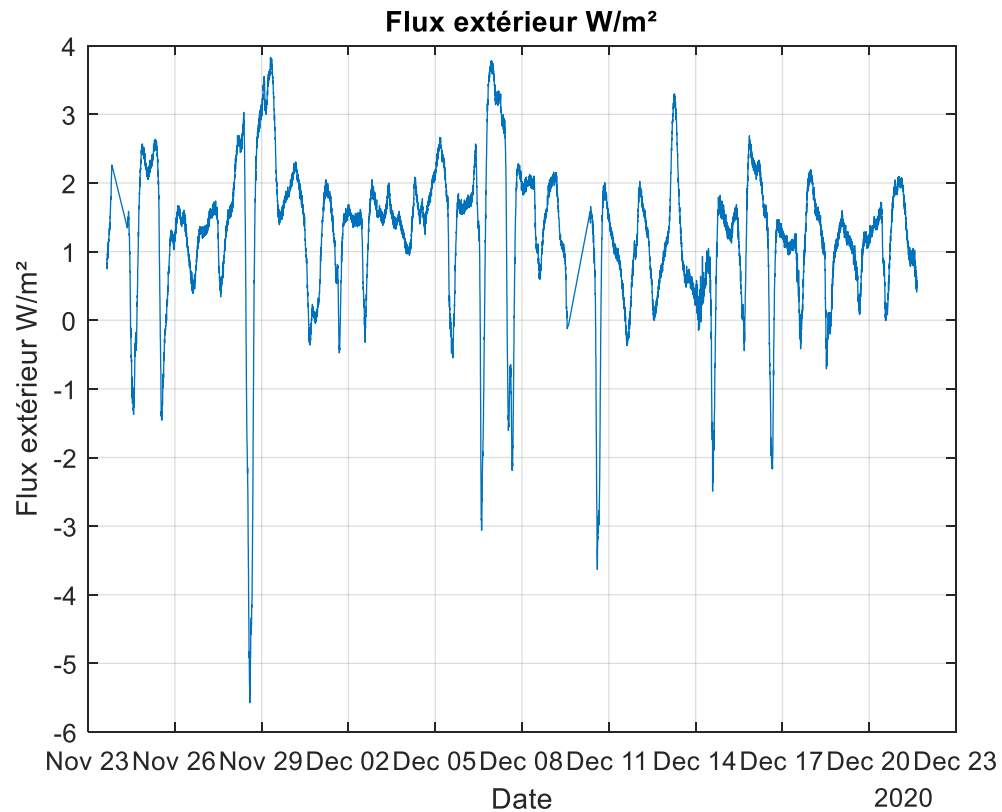
Autres écritures pour d'autres systèmes de coordonnées

La conductivité thermique et la diffusivité thermique ne sont jamais des constantes

- Fonction de la température
- Dans le cas de matériaux biosourcés (matériaux non isotropes, hétérogènes)
 - Propriétés équivalentes
 - Fonction de la position
 - Fonction de la direction
 - Fonction de la teneur en eau



Signaux thermiques du bâtiment



Transformation de Laplace

$$\left\{ \begin{array}{l} \varphi(x, p) = \int_0^{\infty} q(x, t) \cdot e^{-pt} dt \\ \theta(x, p) = \int_0^{\infty} T(x, t) \cdot e^{-pt} dt \end{array} \right\} \longleftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{a. } \frac{\partial^2 \theta(x, p)}{\partial x^2} = p\theta(x, p) - T(x, 0^+) \\ \varphi(x, p) = -\lambda \cdot \frac{\partial \varphi(x, p)}{\partial x} \end{array} \right.$$

Conditions limites

en $x = 0$: $T(1, t), q(1, t)$
en $x = e$: $T(2, t), q(2, t)$

Conditions initiales

pour tout x : $T(x, 0^+) = 0$

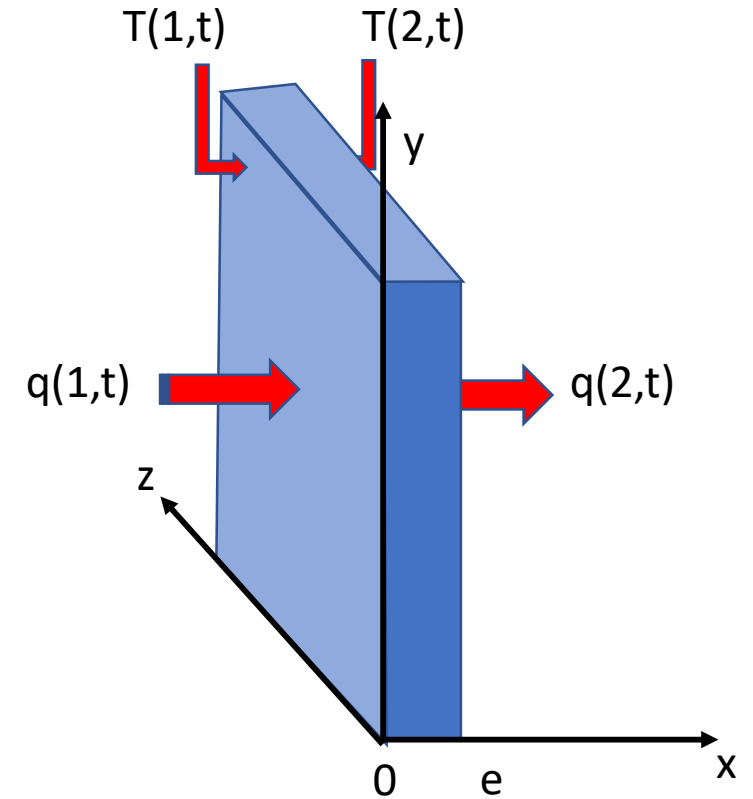
$$\begin{bmatrix} \theta_1(p) \\ \varphi_1(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) & \frac{1}{\lambda\sqrt{\frac{p}{a}}} \cdot sh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) \\ \lambda\sqrt{\frac{p}{a}} \cdot sh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) & ch\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(p) \\ \varphi_2(p) \end{bmatrix}$$

a

diffusivité thermique $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$

λ

conductivité thermique $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$



Rappel : Trigonométrie hyperbolique

$$sh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad sh(jx) = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2} = j \sin(x)$$

$$ch(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad ch(jx) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2} = \cos(x)$$

$$ch^2(x) - sh^2(x) = 1$$

$$ch(x + y) = ch(x).ch(y) + sh(x).sh(y)$$

$$ch(x + jy) = ch(x).cos(y) + j.sh(x).sin(y)$$

$$sh(x + y) = sh(x).ch(y) + ch(x).sh(y)$$

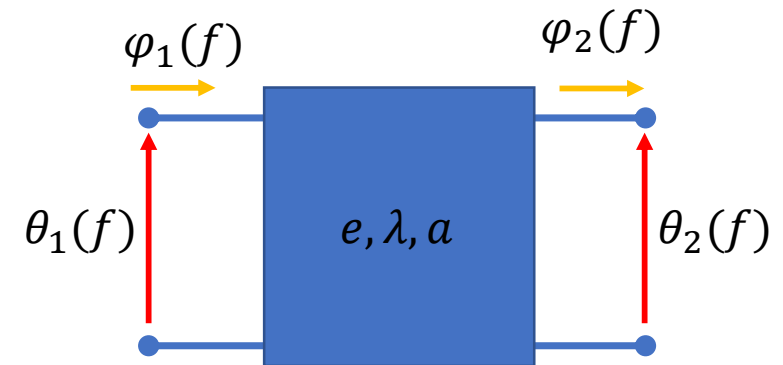
$$sh(x + jy) = sh(x).cos(y) + j.ch(x).sin(y)$$



Espace de Fourier

$$p = \alpha + j\omega \quad \longrightarrow \quad p = j2\pi f \quad \text{avec } j^2 = -1$$

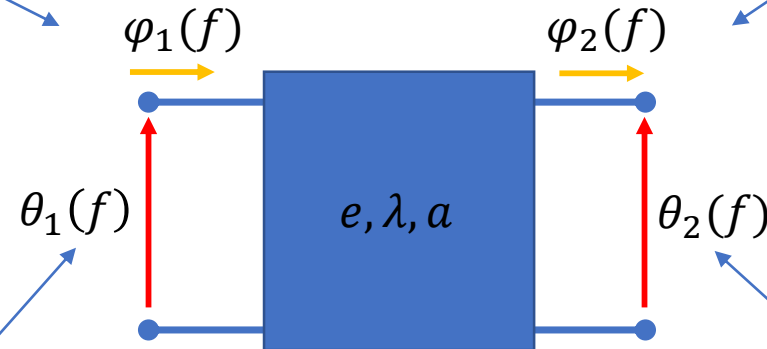
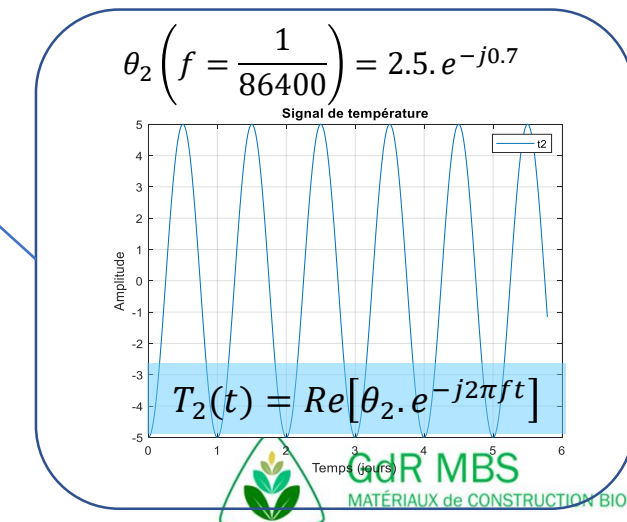
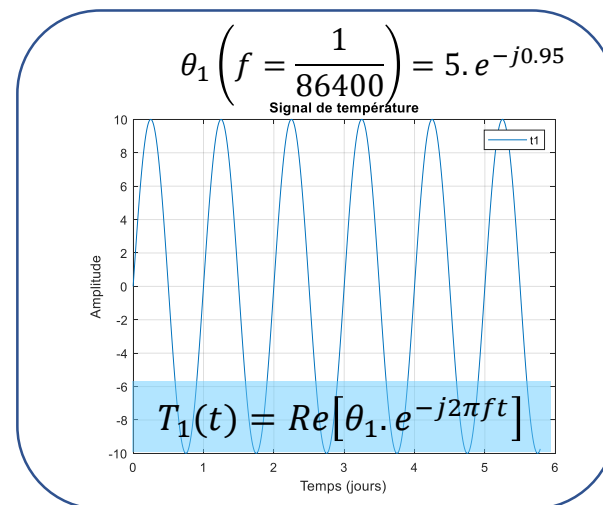
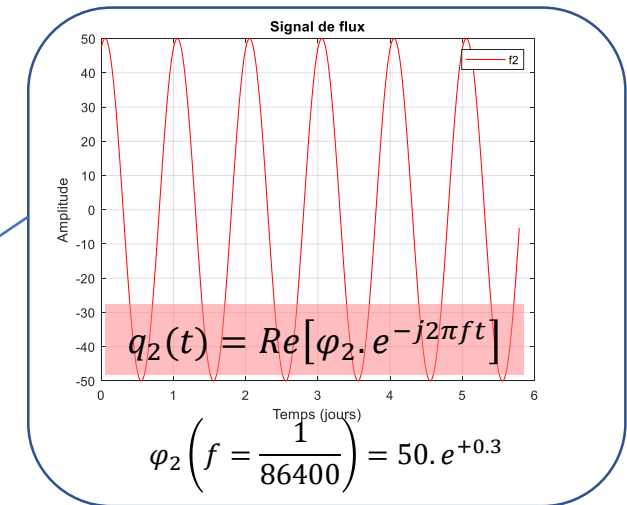
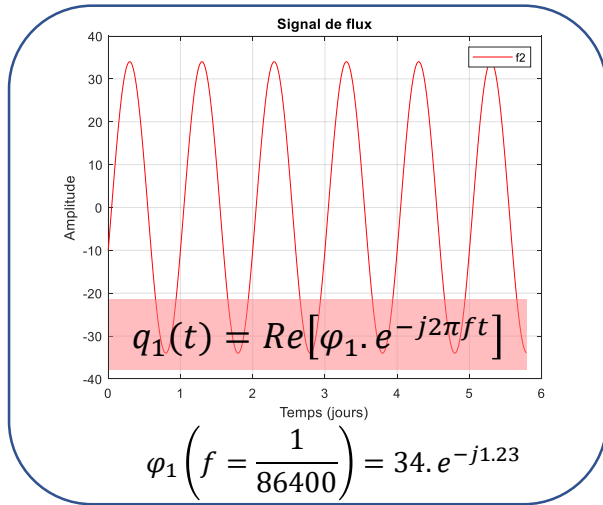
$$\begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) & \frac{1}{\lambda\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}} \cdot sh\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) \\ \lambda\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}} \cdot sh\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) & ch\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix}$$



Remarque : $\det(M)=1$



Matrice liant les amplitudes complexes



$$\begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix} = [M] \cdot \begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix}$$

Relation entre paramètres

$$\rho c = \lambda / a$$

chaleur volumique $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$

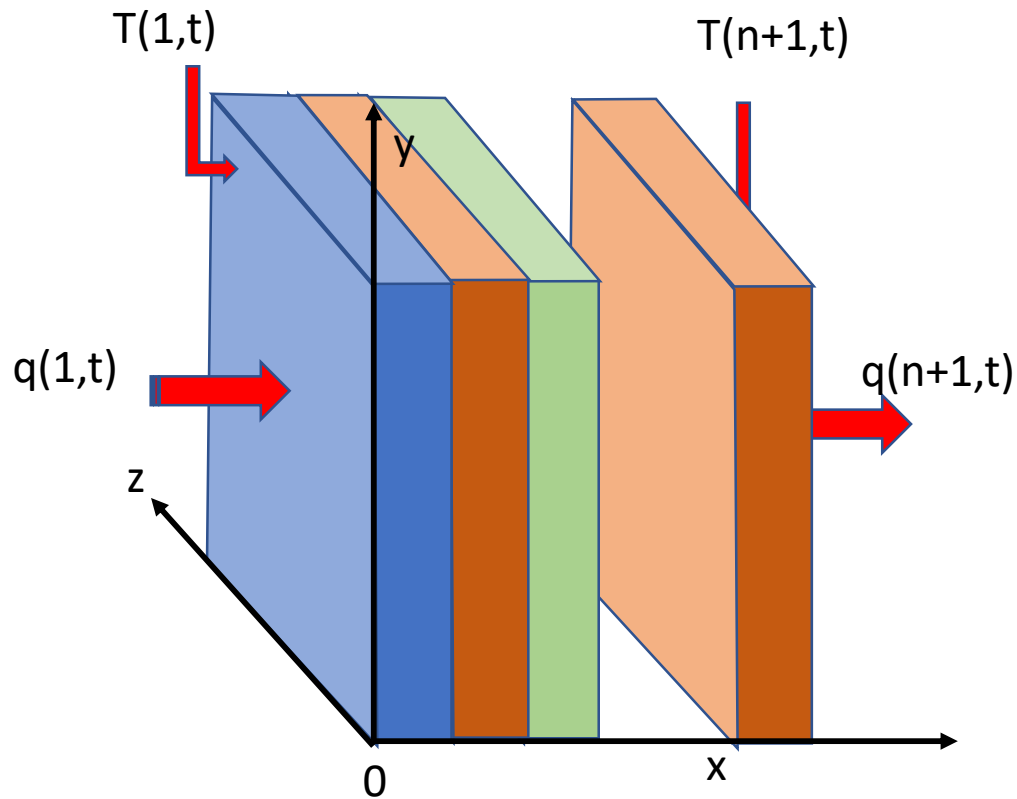
$$b = \sqrt{\lambda \rho c} = \lambda / \sqrt{a}$$

effusivité $\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$

$$\begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left(e \sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) & \frac{1}{b\sqrt{j2\pi f}} \cdot sh\left(e \sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) \\ b\sqrt{j2\pi f} \cdot sh\left(e \sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) & ch\left(e \sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix}$$



Cas d'une paroi multicouche (1D)



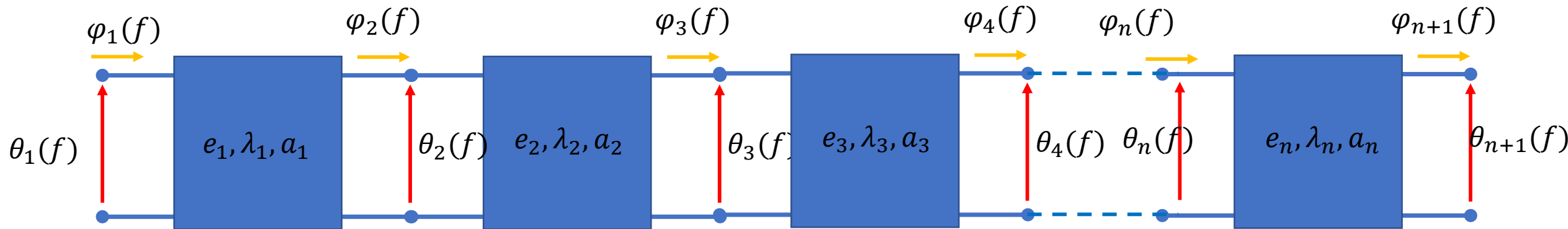
$$\begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left(e_1 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_1}}\right) & \frac{1}{\lambda_1 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_1}}} \cdot sh\left(e_1 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_1}}\right) \\ \lambda_1 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_1}} \cdot sh\left(e_1 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_1}}\right) & ch\left(e_1 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_1}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left(e_2 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_2}}\right) & \frac{1}{\lambda_2 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_2}}} \cdot sh\left(e_2 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_2}}\right) \\ \lambda_2 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_2}} \cdot sh\left(e_2 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_2}}\right) & ch\left(e_2 \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_2}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_3(f) \\ \varphi_3(f) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_n(f) \\ \varphi_n(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ch\left(e_{n+1} \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_{n+1}}}\right) & \frac{1}{\lambda_{n+1} \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_{n+1}}}} \cdot sh\left(e_{n+1} \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_{n+1}}}\right) \\ \lambda_{n+1} \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_{n+1}}} \cdot sh\left(e_{n+1} \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_{n+1}}}\right) & ch\left(e_{n+1} \sqrt{\frac{j2\pi f}{a_{n+1}}}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{n+1}(f) \\ \varphi_{n+1}(f) \end{bmatrix}$$

Cas d'une paroi multicouche (1D)

$$\begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix} = [M_1] \cdot [M_2] \cdot [M_3] \dots \dots [M_n] \cdot \begin{bmatrix} \theta_{2n+1}(f) \\ \varphi_{n+1}(f) \end{bmatrix}$$



Quand f tend vers 0 (composantes continues)

$$ch\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) \xrightarrow{f \rightarrow 0} 1$$

$$sh\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right) \xrightarrow{f \rightarrow 0} e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_1(0) \\ \varphi_1(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{e}{\lambda} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_2(0) \\ \varphi_2(0) \end{bmatrix}$$

❶

$$\theta_1(0) = \theta_2(0) + \frac{e}{\lambda} \cdot \varphi_2(0)$$

Matrice inverse

$$\begin{bmatrix} \theta_2(0) \\ \varphi_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{e}{\lambda} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(0) \\ \varphi_1(0) \end{bmatrix}$$

❷

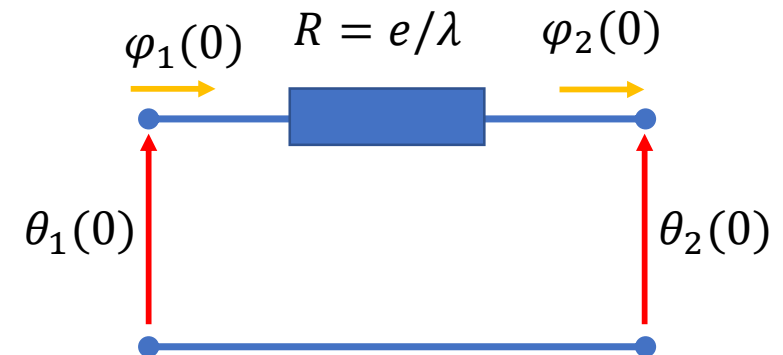
$$\theta_2(0) = \theta_1(0) - \frac{e}{\lambda} \cdot \varphi_1(0)$$

$$\text{❶} - \text{❷} \quad 2(\theta_1(0) - \theta_2(0)) = \frac{e}{\lambda} \cdot (\varphi_1(0) + \varphi_2(0))$$

$$2\Delta\theta(0) = \frac{e}{\lambda} \cdot \Sigma\varphi(0)$$



$$\lambda = e \frac{\Sigma\varphi(0)}{2\Delta\theta(0)}$$



Mise en pratique

Moyenne de la différence des températures

$$\frac{\Delta\theta(f=0)}{\Sigma\varphi(f=0)} = \frac{R}{2}$$

Moyenne de la somme des flux

$e=0.2 \text{ m}$

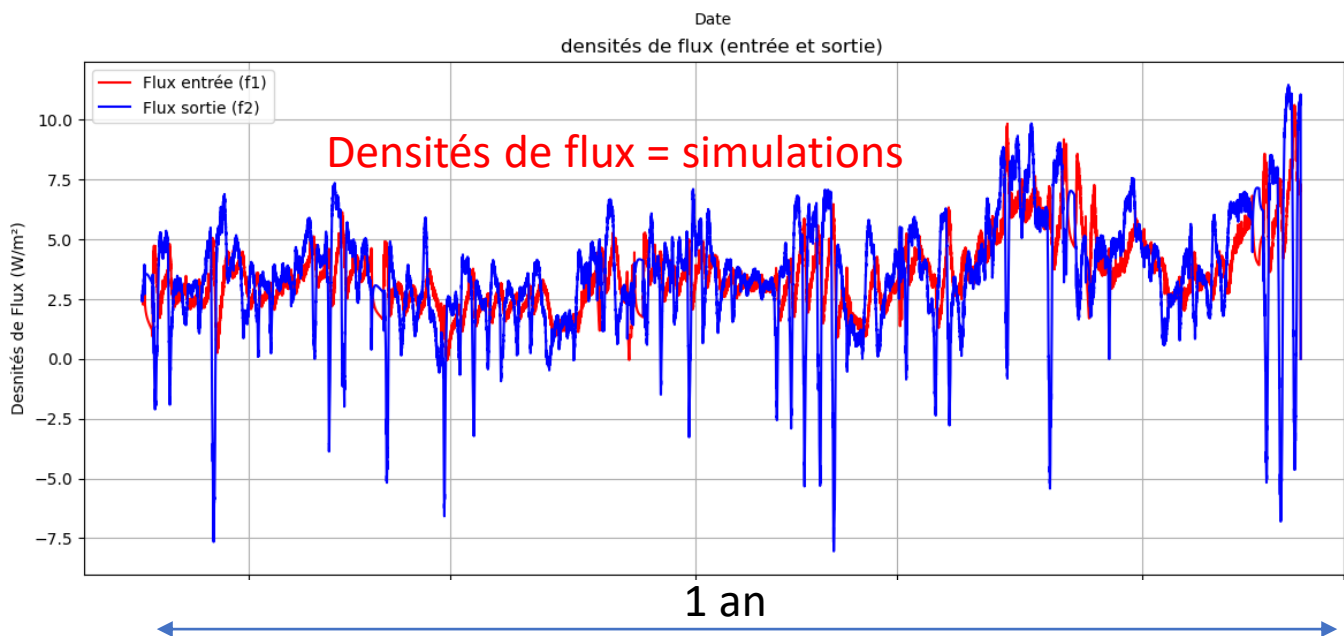
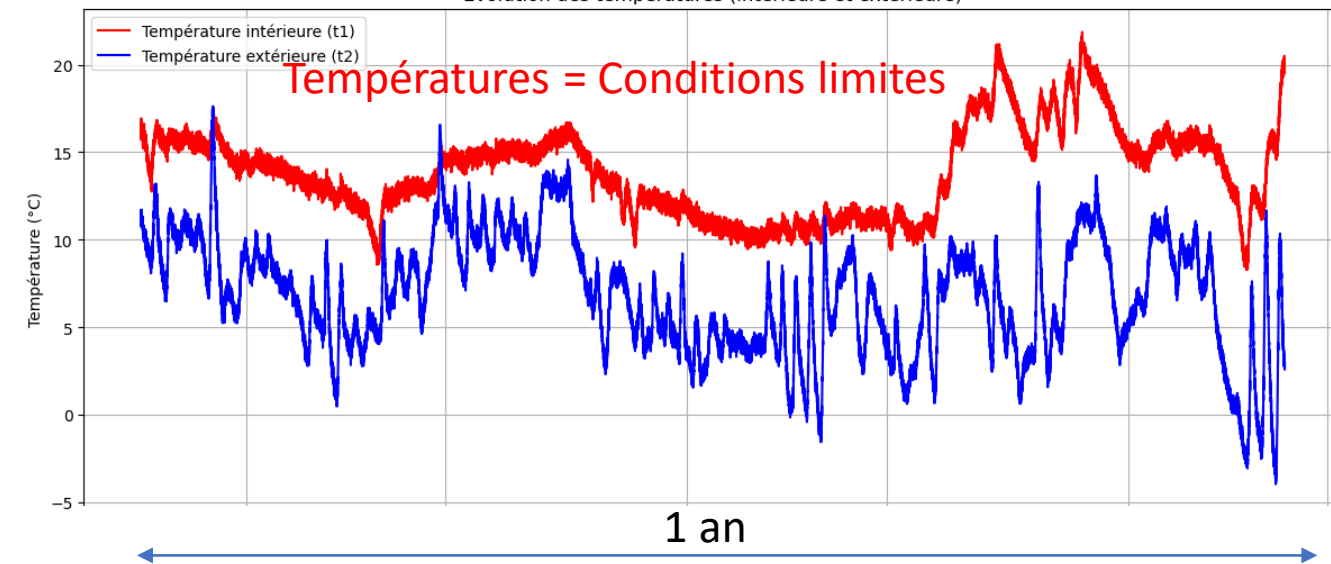


$\lambda = 0.1 \text{ W/(m.K)}$

$\rho c = 200 \text{ kJ/(K.m}^3\text{)}$



Évolution des températures (intérieure et extérieure)



Simulation différences finies

$e=0.2 \text{ m}$



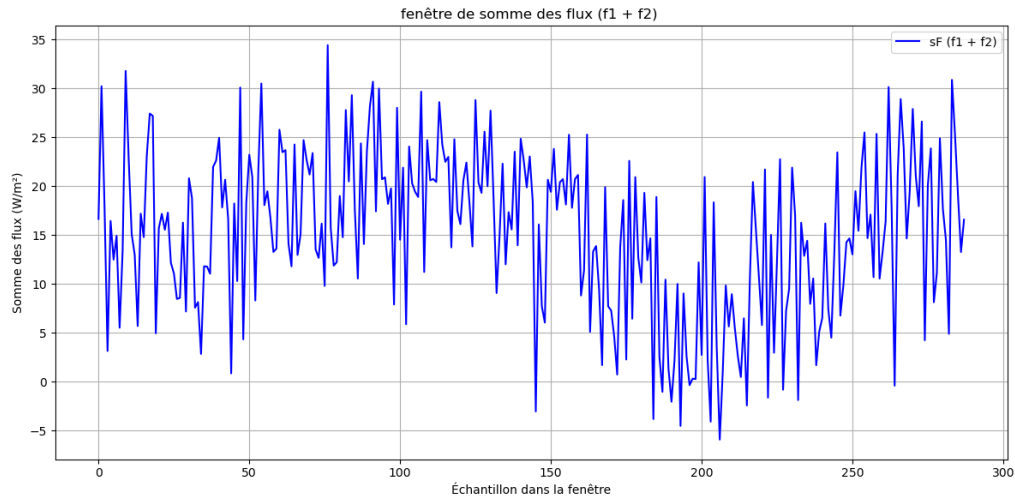
$\lambda = 0.1 \text{ W/(m.K)}$

$\rho c = 200 \text{ kJ/(K.m}^3\text{)}$

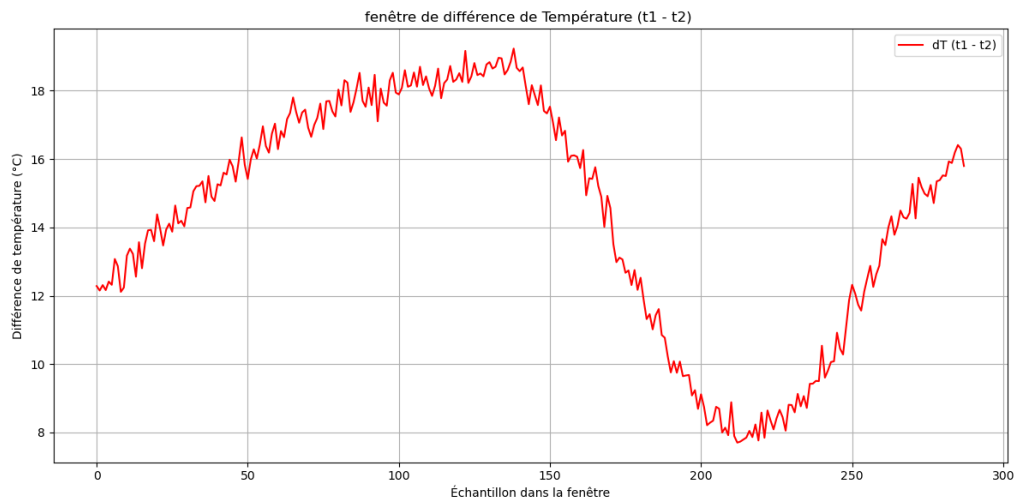


GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Fenêtre de 1 journée choisie au hasard



Moyenne de la somme des flux :
15.167 W/m²

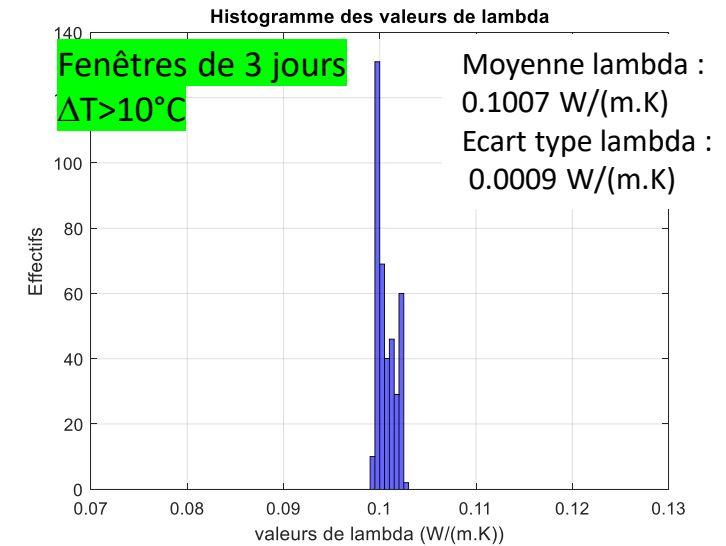
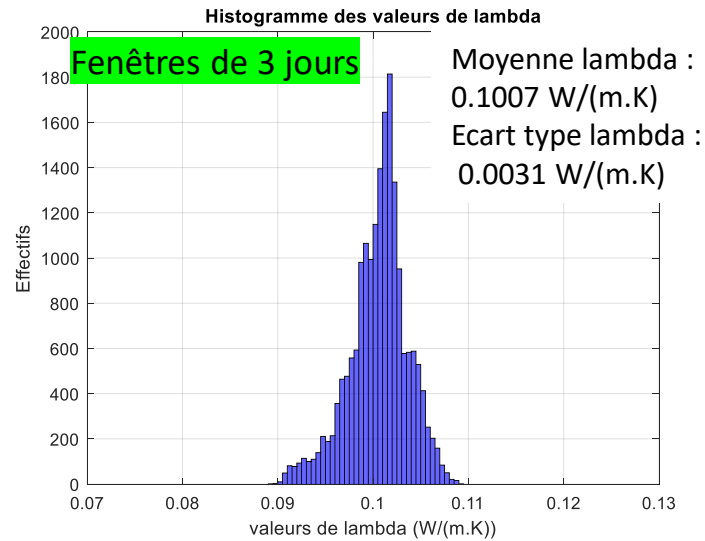
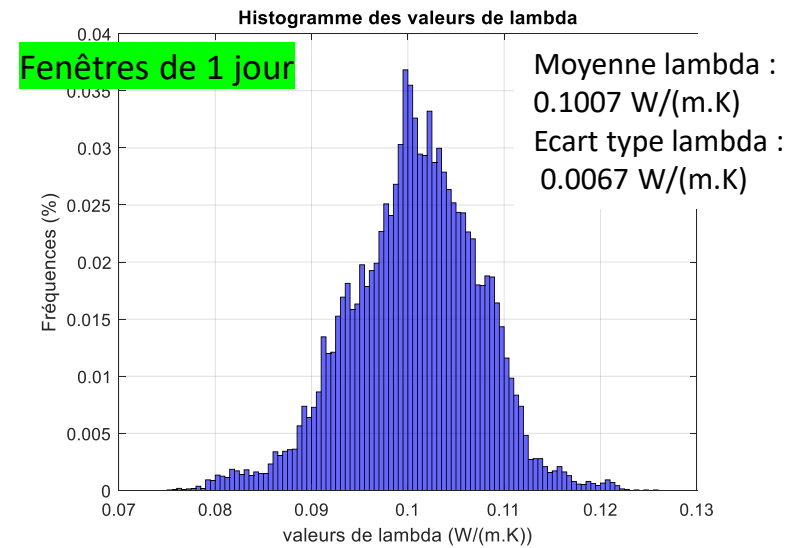


Moyenne de la différence des températures :
14.345 °C

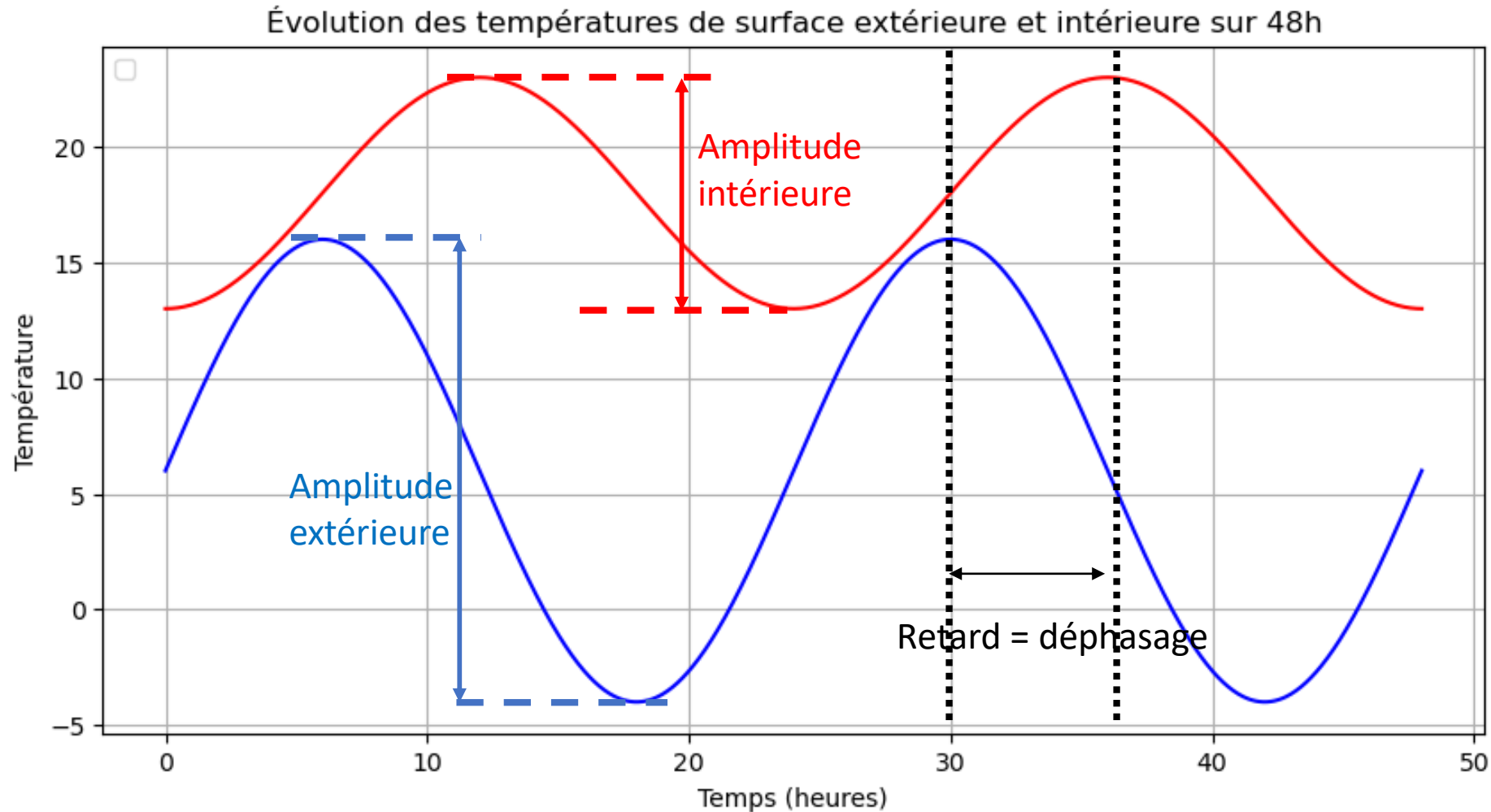
$$\lambda_{inst} = \frac{e}{R} = e \cdot \frac{\Sigma \varphi(f=0)}{2\Delta\theta(f=0)} = 0.0106 \text{ W/(m.K)}$$



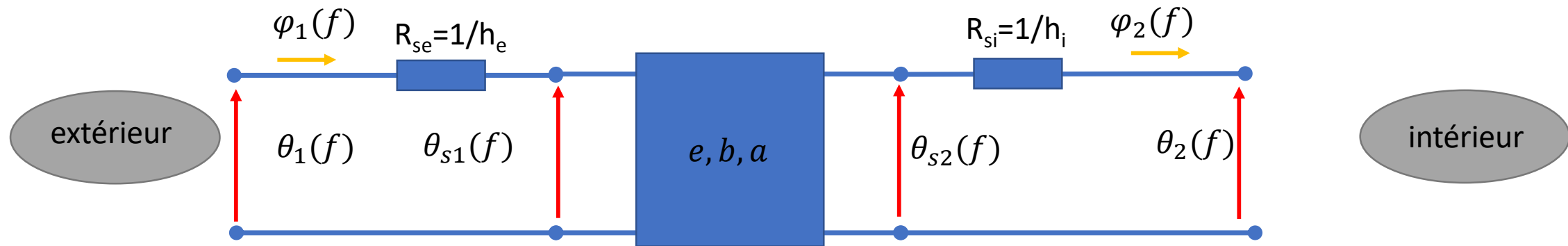
Amélioration de la précision



Déphasage et Amortissement



Déphasage et Amortissement



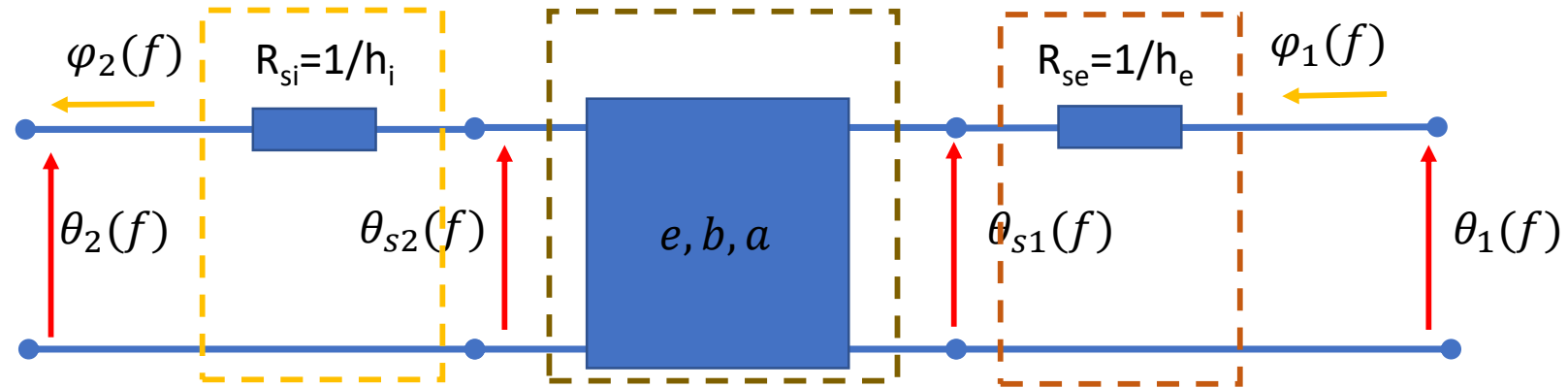
De quoi par rapport à quoi ?

θ_2 par rapport à θ_1

φ_2 par rapport à φ_1

θ_{s2} par rapport à θ_{s1}

Norme EN ISO NF 13786



⚠ Le sens est inversé

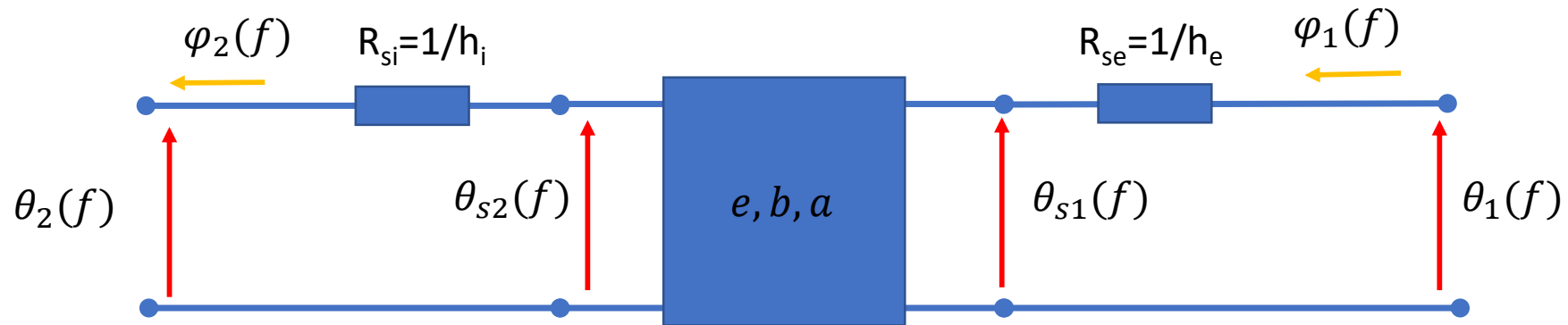
$$\begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -R_{si} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{11p} & Z_{12p} \\ Z_{21p} & Z_{22p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -R_{se} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix}$$



Norme EN ISO NF 13786 :

Coefficient de transmission thermique périodique Y_{12}



$$\begin{bmatrix} \varphi_1(f) \\ -\varphi_2(f) \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{12}} \begin{bmatrix} -Z_{11} & 1 \\ 1 & -Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \theta_2(f) \end{bmatrix} \quad \longrightarrow \quad \varphi_2(f) = \frac{-1}{Z_{12}} \cdot \theta_1(f) + Z_{22} \cdot \theta_2(f)$$

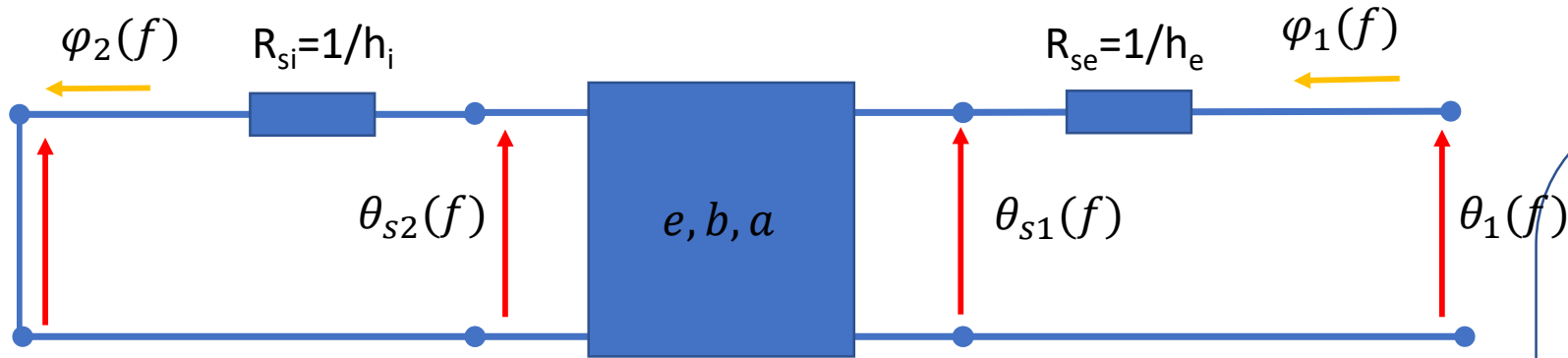
Caractéristiques thermiques dynamiques

Coefficient de transmission thermique périodique Y_{12}

Avec $Y_{12} = -1/Z_{12} = \frac{\varphi_2(f)}{\theta_1(f)}$ avec $\theta_2(f) = 0$



Déphasage et Amortissement



$\frac{\varphi_2(f)}{\theta_1(f)}$ → Argument donne le déphasage
→ Module donne l'amortissement

$\frac{\varphi_2(f)}{\theta_1(f)}$ dépend de :

- a, b, e : les caractéristiques du matériau
- h_i et h_e : les coefficients d'échange
- f : la fréquence
- $\theta_2(f)$



Exemple (celui de la norme) Mur homogène de béton

$$\varphi_2/\theta_1$$

Conductivité thermique $\lambda = 1.8 \text{ W/(m.K)}$

Masse volumique $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$

Capacité thermique massique $c = 1000 \text{ J/(kg.K)}$

Épaisseur = 0.2 m

Période = 24h $f = 1.157 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$

$R_{si} = 0.13 \text{ K.m}^2/\text{W}$

$R_{se} = 0.04 \text{ K.m}^2/\text{W}$

Zint

Zparoi

Zext

$$\begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.13 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.3788 + 1.8585i & -0.0973 - 0.0705i \\ 22.1609 - 30.5525i & 0.3788 + 1.8585i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -0.04 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \theta_2(f) \\ \varphi_2(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2.5021 + 5.8303i & -0.0464 - 0.5454i \\ 22.1609 - 30.5525i & -0.5076 + 3.0806i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \varphi_1(f) \end{bmatrix}$$

$$Z_{12} = -0.0464 - 0.5454i$$

$$Y_{12} = 0.1549 - 1.8205i$$

$$\frac{\varphi_2(f)}{\theta_1(f)}$$

$$|Y_{12}| = 1.83 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$\arg(Y_{12}) = -1.49 \text{ rad}$$

$$\text{Déphasage} = \arg(Y_{12}) \cdot 24 / 2\pi = -5.68 \text{ h}$$



Autre exemple paroi homogène matériau biosourcé

$$\varphi_2/\theta_1$$

Conductivité thermique $\lambda = 0.1 \text{ W/(m.K)}$

Chaleur volumique $\rho c = 200000 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$

Epaisseur = 0.2 m

Période = 24h : $f = 1.157 \cdot 10^{-5} \text{ Hz}$

$R_{si} = 0.13 \text{ K.m}^2/\text{W}$

$R_{se} = 0.04 \text{ K.m}^2/\text{W}$

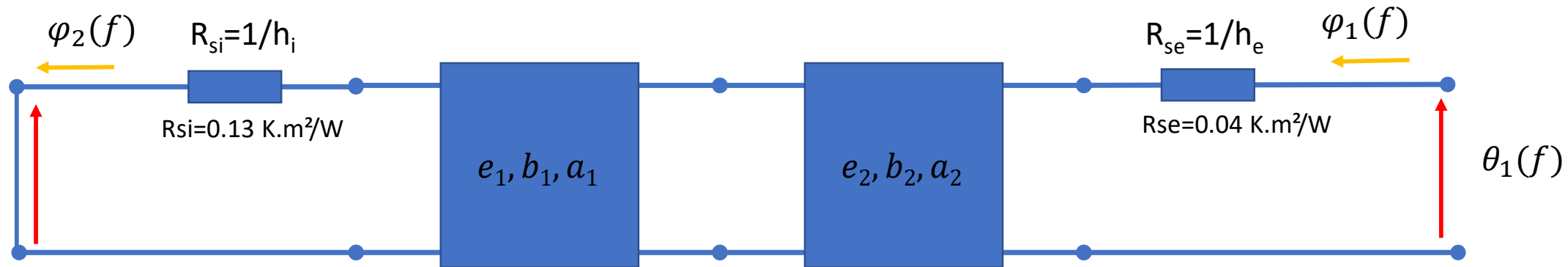
$$|Y_{12}| = 0.37 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$$

$$\text{Déphasage} = \arg(Y_{12}) * 24 / 2\pi = -3.97 \text{ h}$$

Le déphasage φ_2 / φ_1 donne -6.68h



Déphasage et Amortissement



Couche a

Conductivité thermique $\lambda = 1.8 \text{ W/(m.K)}$

Chaleur volumique $\rho c = 2400 \cdot 1000 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$

Épaisseur = 0.2 m

$$|Y_{12_a}| = 1.8271 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$\text{Déphasage}_a = \arg(Y_{12a}) \cdot 24/2\pi = -5.68 \text{ h}$$

Couche b

Conductivité thermique $\lambda = 0.1 \text{ W/(m.K)}$

Chaleur volumique $\rho c = 200000 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$

Épaisseur = 0.2 m

$$|Y_{12_b}| = 0.37 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

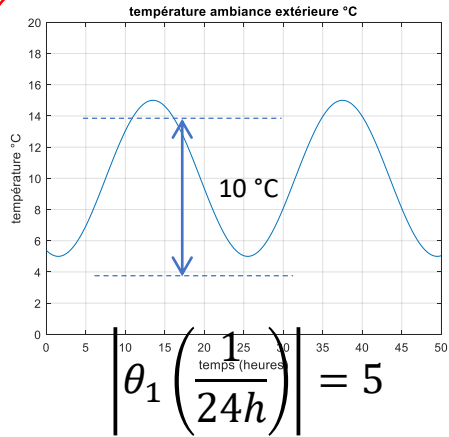
$$\text{Déphasage}_b = \arg(Y_{12b}) \cdot 24/2\pi = -3.97 \text{ h}$$

$$|Y_{12_{a+b}}| = 0.1151 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

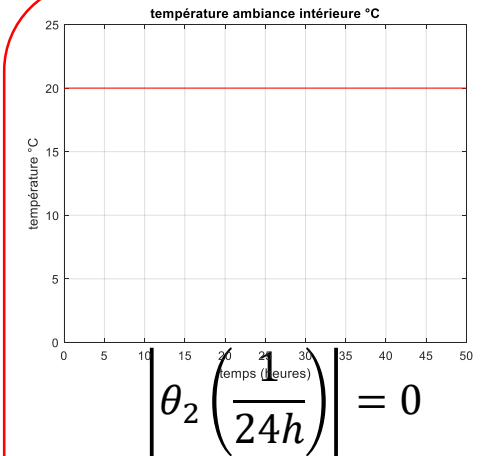
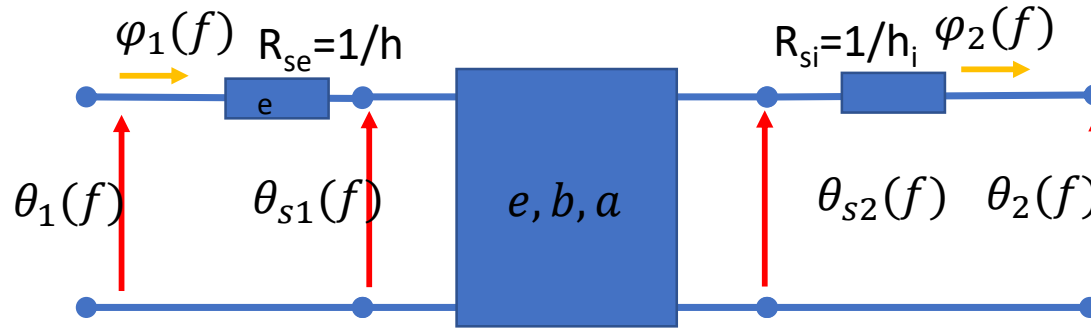
$$\text{Déphasage}_{a+b} = \arg(Y_{12_{a+b}}) \cdot 24/2\pi = -10.47 \text{ h}$$



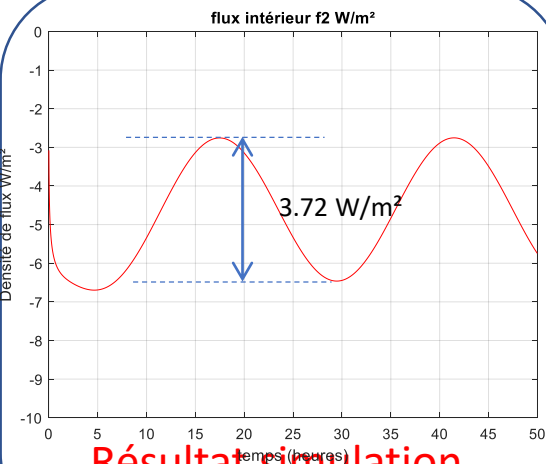
Détermination à partir des données



Conditions limites imposées

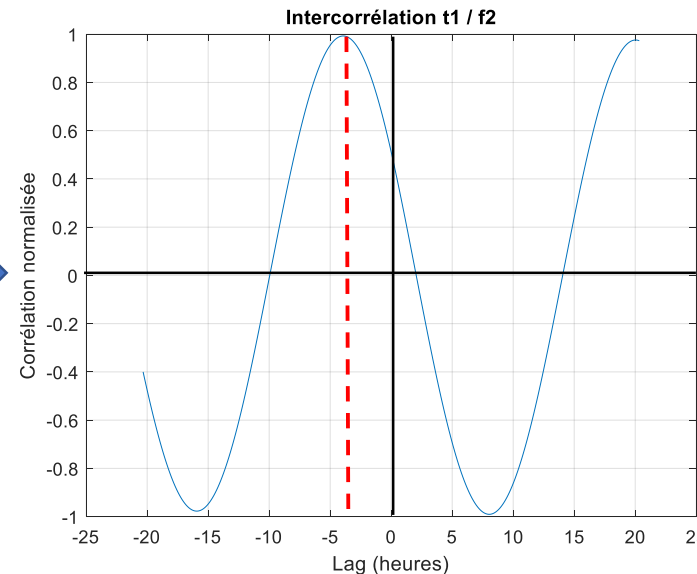


Conditions limites imposées



Résultat simulation
en différences finies

$R_{t1f2}(\tau)$
intercorrrelation



Amortissement = $0.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Déphasage : -3.94 heures

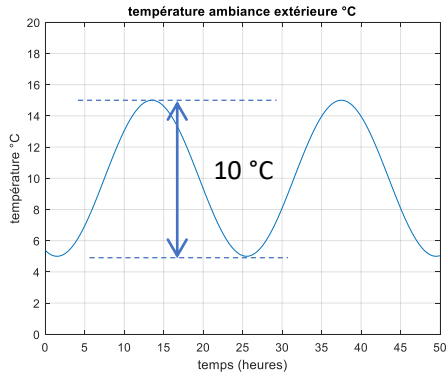
$$|Y_{12}| = 0.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\text{Déphasage} = \arg(Y_{12}) * 24 / 2\pi = -3.97 \text{ h}$$

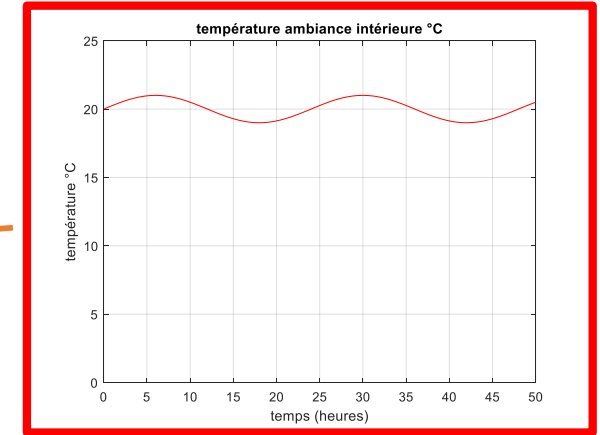
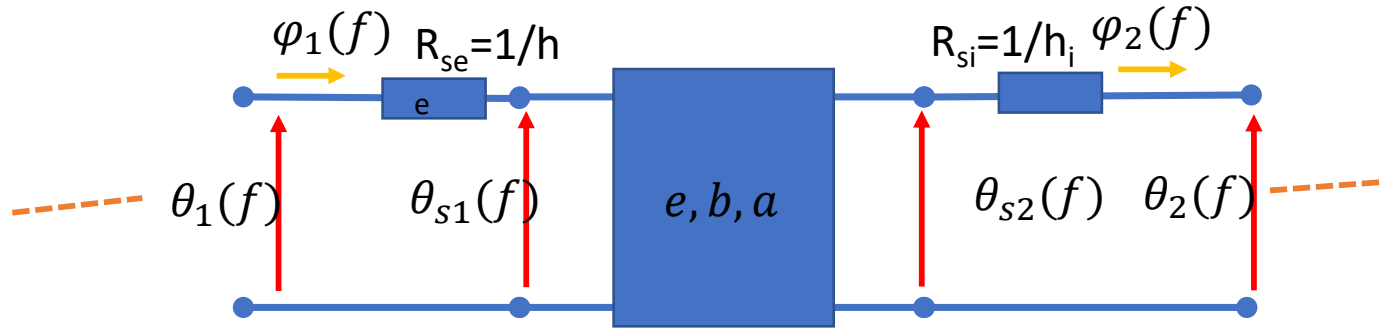


GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Détermination à partir des données



$$\left| \theta_1 \left(\frac{1}{24h} \right) \right| = 5$$



$$\left| \theta_2 \left(\frac{1}{24h} \right) \right| = 1$$

Amortissement = $0.56 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

Déphasage : -3.1 heures

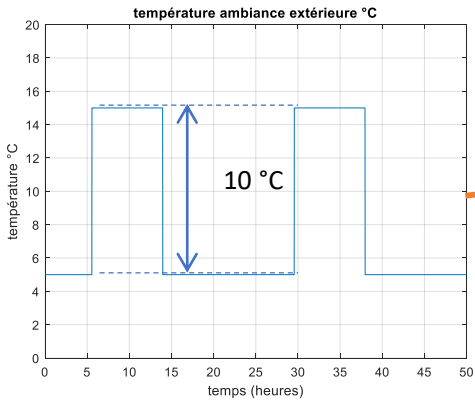
$$|Y_{12}| = 0.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\text{Déphasage} = \arg(Y_{12}) * 24 / 2\pi = -3.97 \text{ h}$$

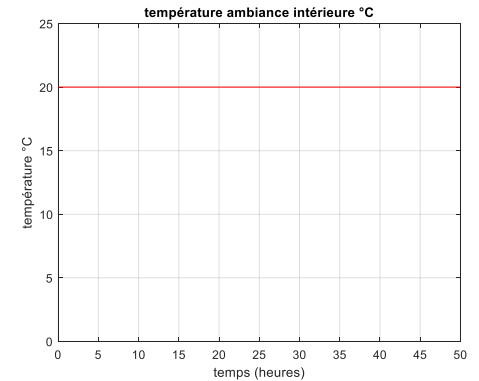
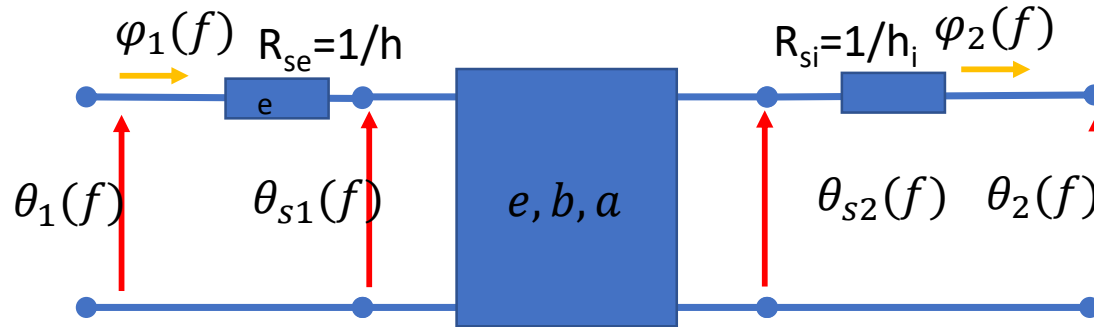


GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

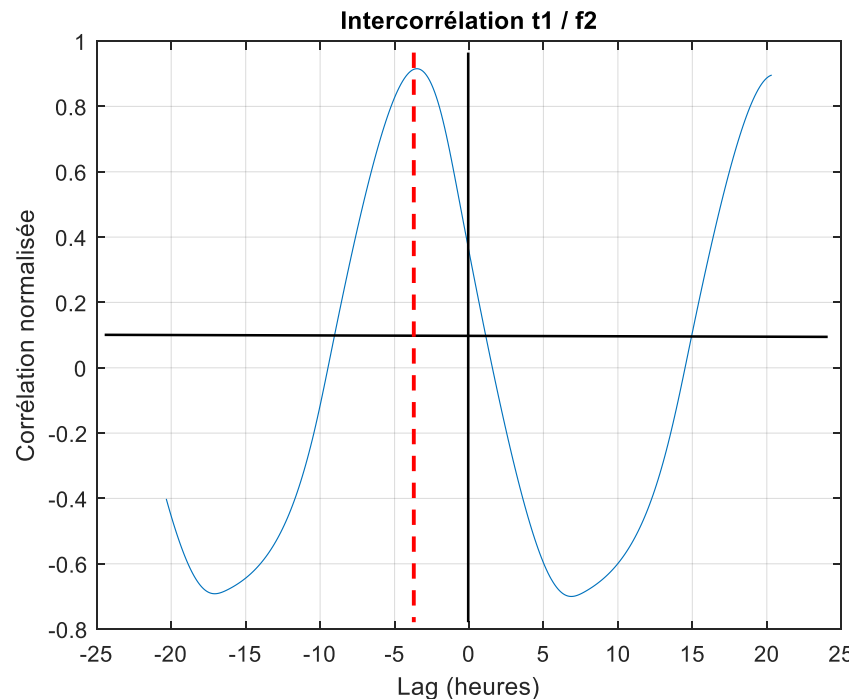
Détermination à partir des données



$$\left| \theta_1 \left(\frac{1}{24h} \right) \right| = ?$$



$$\left| \theta_2 \left(\frac{1}{24h} \right) \right| = 0$$

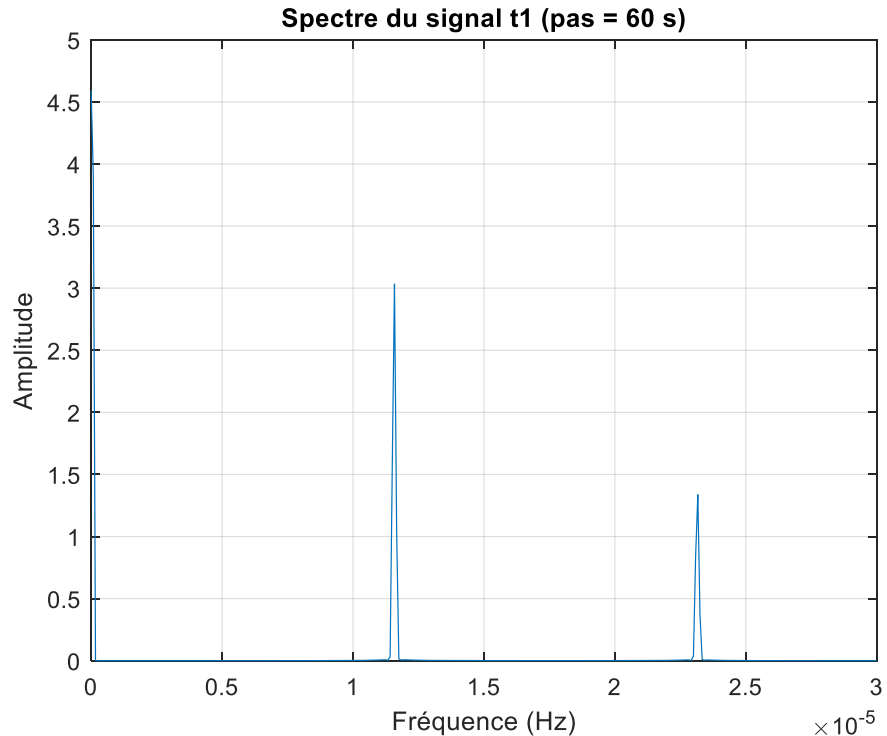


Atténuation = $0.43 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
Déphasage : -3.5 heures

$$|Y_{12}| = 0.37 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$\text{Déphasage} = \arg(Y_{12}) * 24 / 2\pi = -3.97 \text{ h}$$

Profondeur de pénétration



$$\delta(f) = \sqrt{\frac{\lambda T}{\pi \rho c}} = \sqrt{\frac{a}{\pi f}} \text{ profondeur de pénétration périodique (m)}$$

- Fondamentale : 1 jour = 86400 s : $f_0 = 1.157 \cdot 10^{-5}$ Hz
- 1^{er} harmonique : 12h = 43200 s : $f_1 = 2.314 \cdot 10^{-5}$ Hz
- 2^{ème} harmonique : 8h = 28800 s : $f_2 = 3.472 \cdot 10^{-5}$ Hz

Conductivité thermique $\lambda = 0.1$ W/(m.K)

Chaleur volumique $\rho c = 200000$ J/(K.m³)

Epaisseur = 0.2 m

Diffusivité thermique $a = 5 \cdot 10^{-7}$ m²/s

$$\delta(f_0) = 0.117 \text{ m}$$

$$\delta(f_1) = 0.083 \text{ m}$$

$$\delta(f_2) = 0.068 \text{ m}$$

Si épaisseur $> 3 \delta(f)$ paroi semi – infinie pour la composante f



Passage au milieu semi-infini

$$\begin{bmatrix} \varphi_1(f) \\ -\varphi_2(f) \end{bmatrix} = \frac{1}{Z_{12}} \begin{bmatrix} -Z_{11} & 1 \\ 1 & -Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1(f) \\ \theta_2(f) \end{bmatrix}$$

$$\varphi_1(f) = \frac{-Z_{11}}{Z_{12}} \cdot \theta_1(f) + Z_{22} \cdot \theta_2(f)$$

Pour un milieu homogène :

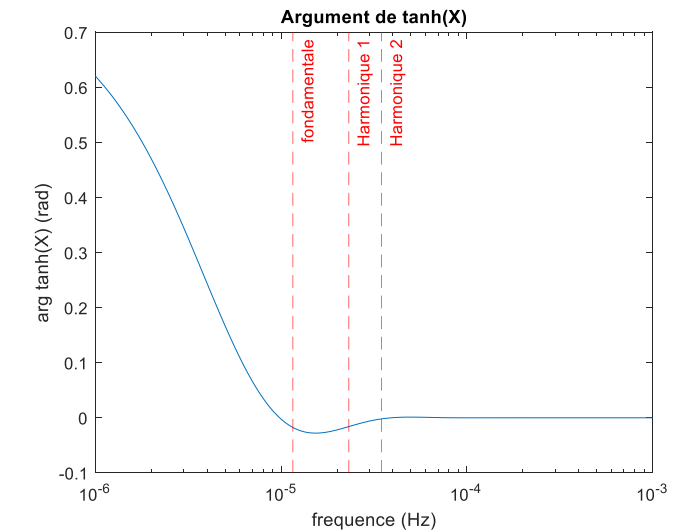
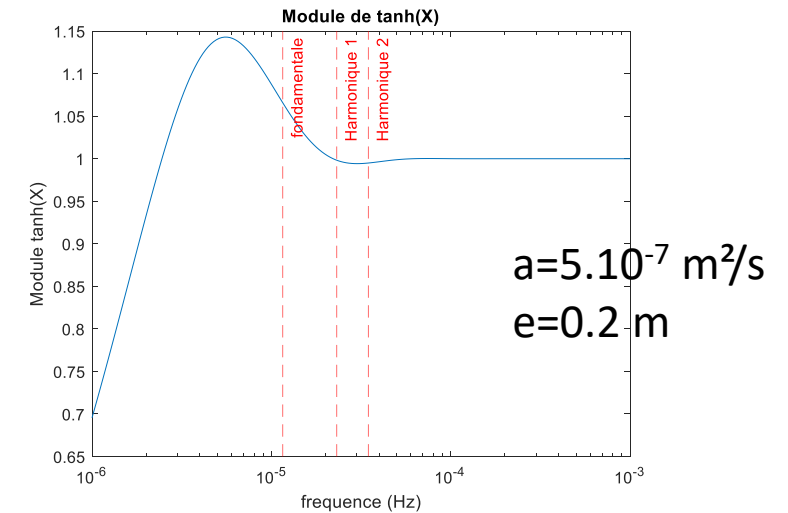
$$\varphi_1(f) = \frac{ch\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right)}{\frac{1}{b\sqrt{j2\pi f}} \cdot sh\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right)} \cdot \theta_1(f) = b\sqrt{j2\pi f} \cdot \tanh\left(e\sqrt{\frac{j2\pi f}{a}}\right)$$

$$\frac{\theta_1(f)}{\varphi_1(f)} = \frac{1}{b\sqrt{j2\pi f}} = Z_{inf}(f)$$

Impédance de milieu semi-infini

$$b = \sqrt{\lambda \rho c} = \lambda / \sqrt{a}$$

effusivité $J \cdot m^{-1} \cdot K^{-1} \cdot s^{-1/2}$



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS

Milieu semi-infini / Effusivité

$$\frac{\theta_1(f)}{\varphi_1(f)} = \frac{1}{b\sqrt{j2\pi f}} = Z_{inf}(f)$$

Conductivité thermique $\lambda = 0.1 \text{ W/(m.K)}$

Chaleur volumique $\rho c = 200000 \text{ J/(K.m}^3\text{)}$

$$\text{Effusivité } b = \sqrt{\lambda \rho c} = \lambda / \sqrt{a} = 141 \text{ J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$$

Température de contact entre 2 matériaux

$$T_c = \frac{b_1 \cdot T_1 + b_2 \cdot T_2}{b_1 + b_2}$$

Matériaux	Effusivité $\text{J.m}^{-1}.\text{K}^{-1}.\text{s}^{-1/2}$
polystyrène	20 à 60
bois	100 à 600
Fibre de bois	110
Plâtre	450
béton	1200 à 2500
peau	1200
aluminium	23000



5^{ème} Ecole d'automne du GDR MBS

Eco-conception des matériaux biosourcés et géosourcés : de la ressource à la fin de vie

12 au 16 octobre 2025, Douai



Matériaux à changement de phase (MCP) dans les matériaux biosourcés

Laurent ZALEWSKI

Professeur des universités

Université d'Artois

Directeur Faculté des Sciences Appliquées

Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE)

laurent.zalewski@univ-artois.fr



Laboratoire
de Génie Civil
et géo-Environnement



IMT Nord Europe
École Mines-Télécom
IMT-Université de Lille



GdR MBS
MATÉRIAUX de CONSTRUCTION BIOSOURCÉS



Stockage de l'énergie thermique

- **Stockage énergie sensible --> élévation température du matériau**

Pour une masse m de matière, si sa température change de T_1 à T_2 à pression constante :

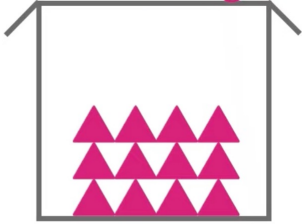
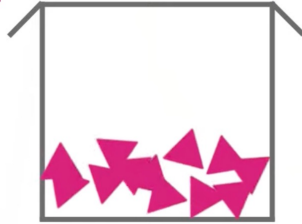
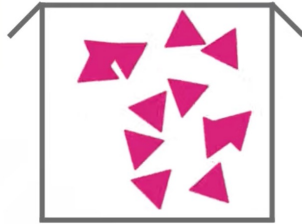
$$Q_{\text{sensible}} = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT$$

- Q_{sensible} = énergie sensible (J)
- $C_p(T)$ = capacité calorifique massique ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), fonction de T
- T_1, T_2 = températures initiale et finale (K ou °C)

- Stockage énergie latente --> changement d'état du matériau

Modéliser les états physiques



Etat solide	Etat liquide	Etat gazeux
en contact immobiles bien organisées 	en contact mobiles positions aléatoires 	éloignées mobiles positions aléatoires 
L'état solide est compact et ordonné.	L'état liquide est compact et désordonné.	L'état gazeux est dispersé et désordonné.

Lorsque de l'énergie est apporté à température de fusion :

- Cette énergie sert à **rompre partiellement les liaisons** ou interactions qui maintiennent la structure solide.
- Les molécules gagnent la liberté de glisser les unes par rapport aux autres. Mais leur énergie cinétique moyenne (donc la température) **reste la même** tant que toute la matière n'est pas fondue.

- **Stockage énergie latente --> changement d'état du matériau**

Soit une masse d'eau $m = 1\text{kg}$ subit un changement d'état solide à -20°C vers un état liquide à 80°C

$$Q(T) = \underbrace{m \cdot C_{p\text{-glace}} \cdot (T - T_{\text{ref}})}_{\text{Sensible heat in solid}} + \underbrace{m \cdot L_f}_{\text{Latent heat}} + \underbrace{m \cdot C_{p\text{-eau}} \cdot (T_{\text{fin}} - T)}_{\text{Sensible heat in liquid}}$$



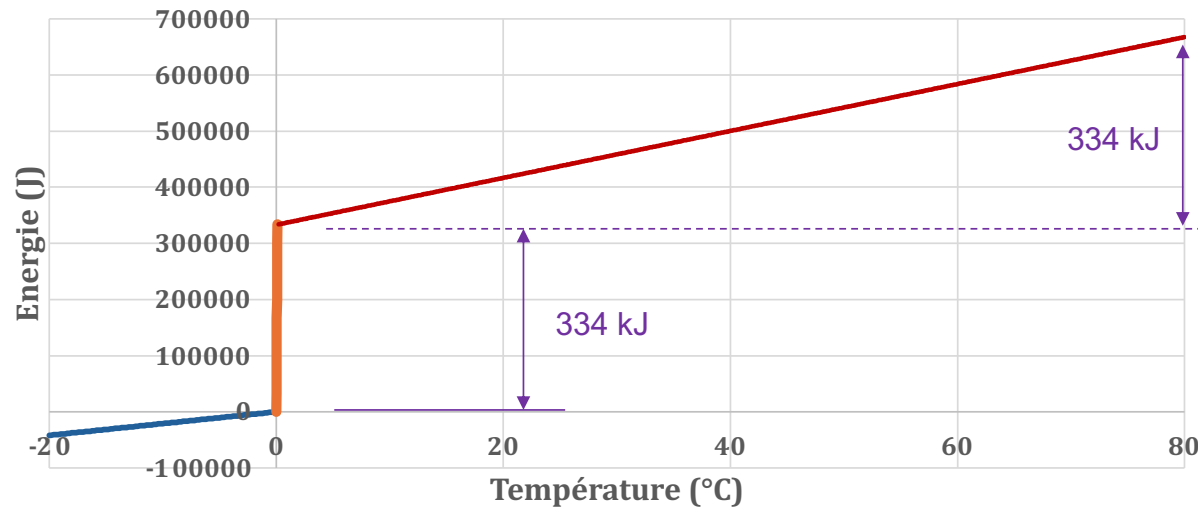
- $C_{p\text{-glace}} = 2.1 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ est la capacité thermique massique de la glace
 T_{ref} est la température de référence (ici -20°C)

$L_f = 334 \text{ kJ/kg}$
est la chaleur latente de fusion

$C_{p\text{-eau}} = 4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ est la capacité thermique massique de l'eau à l'état liquide

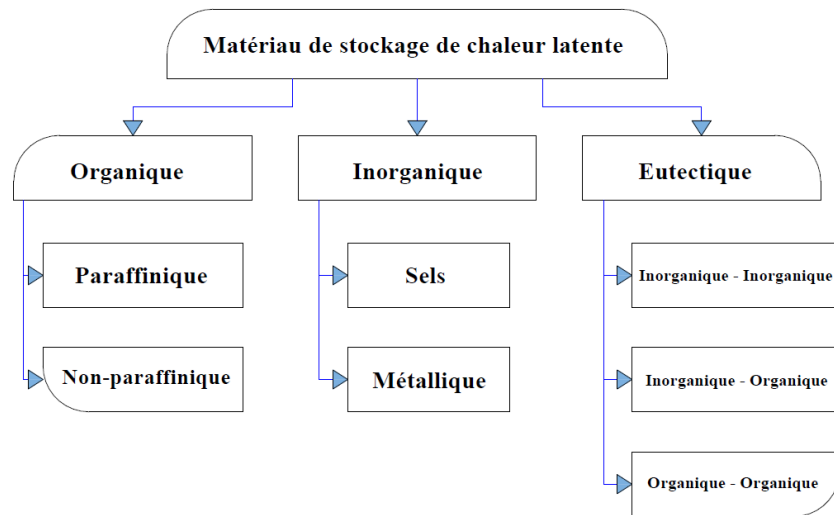
$$Q_{\text{solide}} = 2100 \cdot [0 - (-20)] = 42 \text{ kJ}$$

$$Q_{\text{liquide}} = 4180 \cdot [80 - 0] = 334 \text{ kJ}$$

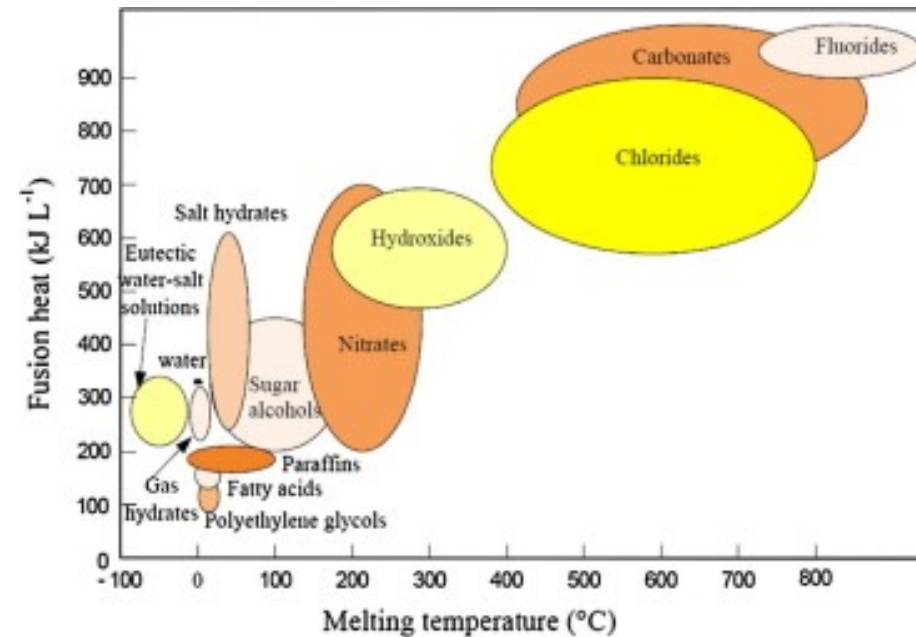


Stockage latent permet de stocker plus d'énergie qu'un matériau classique à volume égal

• Plusieurs familles MCP :



Heat and cold storage with PCM, H Mehling, LF Cabeza, Heat and mass transfer, 2008 Springer



⇒ **Choix du MCP** : capacité de stockage, prix, durabilité, température fusion, stabilité chimique, Dilatation/contraction --> Contraintes mécaniques, compatibilité avec contenant, problème de ségrégation, matériau bio-sourcé, recyclabilité, etc.

• Conditionnement des MCP :

Microencapsulation



Macroencapsulation



Macroencapsulation - CSM
PCM in Aluminum Case

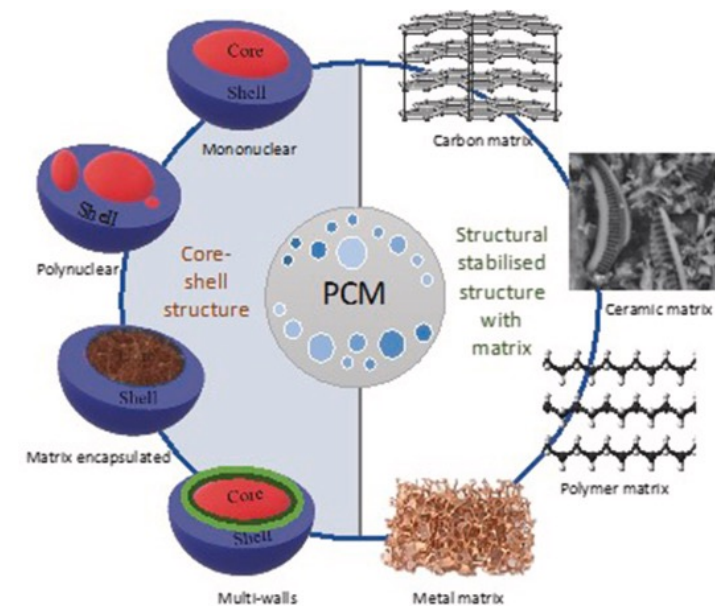
Accumulateur à changement de phase

GROUPE ÉNERSTAT Inc.

Le stockage (de chaud ou de froid) et la récupération d'énergie

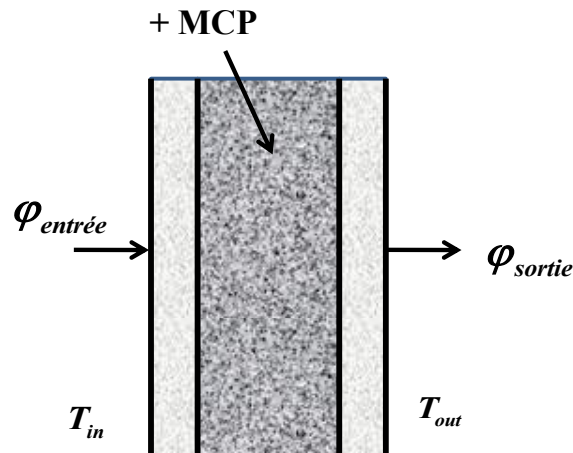


Matériau composite



Zhu Jang, Anabel Palacios, Boyang Zou, Yanqi Zhao, and al.
A review on the fabrication methods for structurally stabilised composite phase change materials and their impacts on the properties of materials, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 159, 2022

- **Caractérisation** : nécessité de connaître les propriétés des matériaux pour modéliser leur comportement thermique et évaluer leurs performances énergétiques



$$\rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \dot{q}$$

$\dot{q}$ = terme source

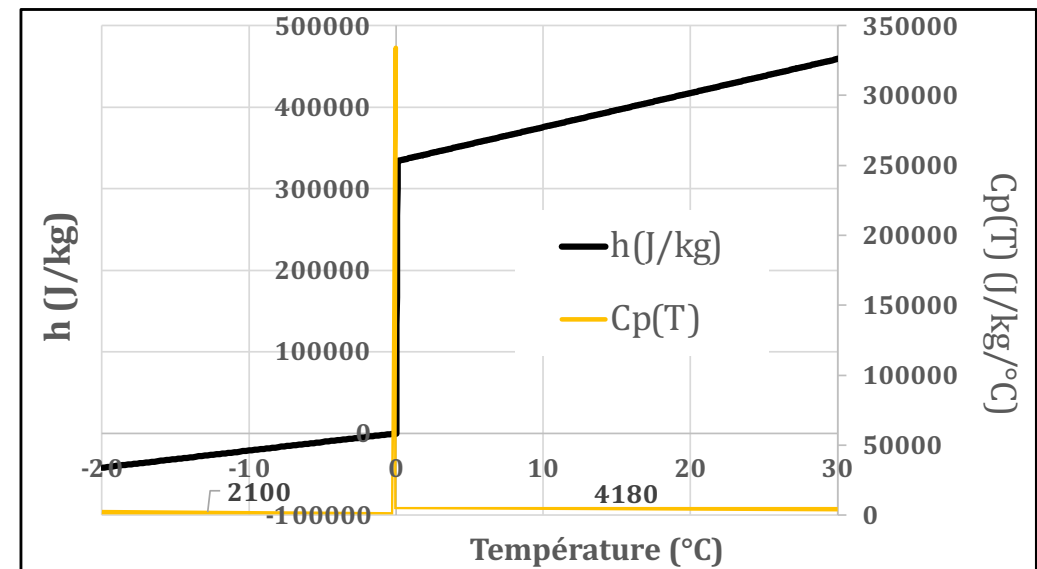
$$\dot{q} = \rho \cdot L \cdot \frac{\partial f(x,t)}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

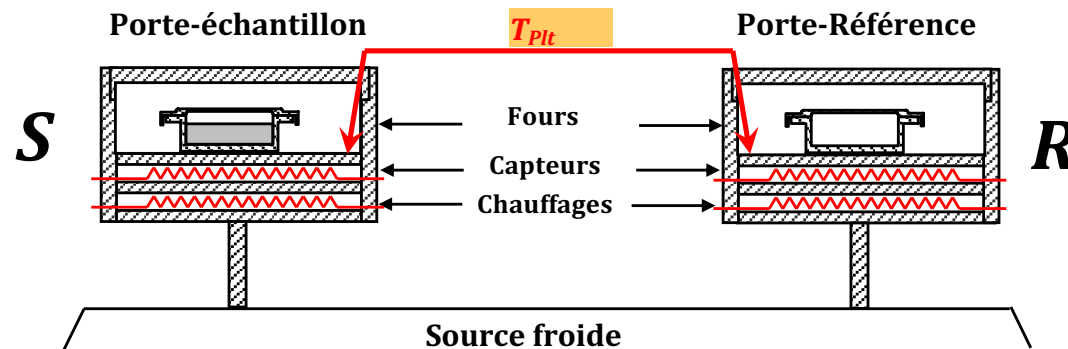
$$\frac{\partial h}{\partial t} = C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t}$$

⇒ méthode du $C_p(T)$ apparent

⇒ déterminer $h(T)$



• Caractérisation : Calorimètre Différentiel à Balayage (DSC)

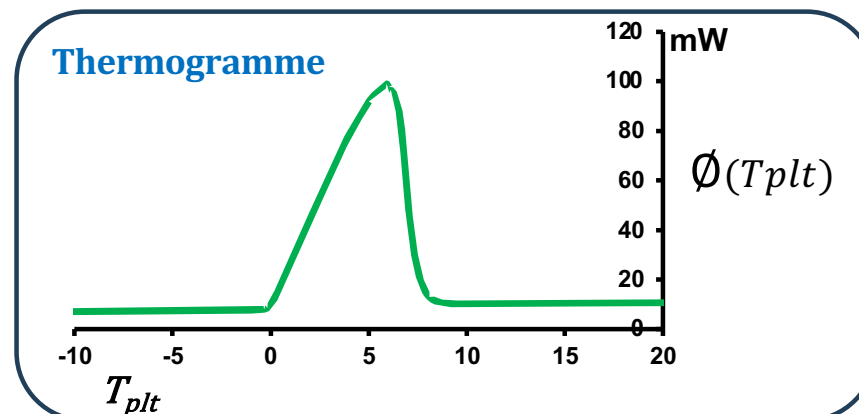


m : masse MCP : quelques mg

$$T_{plt} = T_0 + \beta t$$

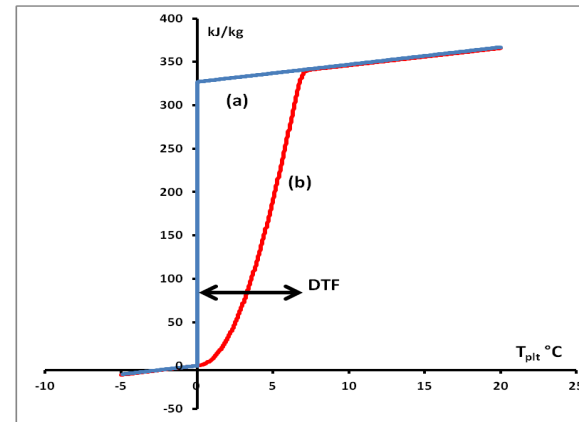
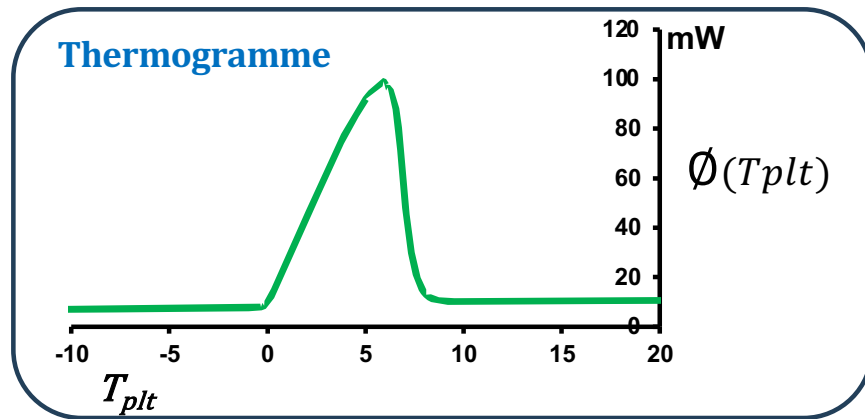
$$\Rightarrow \text{Flux} : \phi(t) \Rightarrow \text{Flux} : \phi(T_{plt})$$

β : vitesse réchauffement °C/min



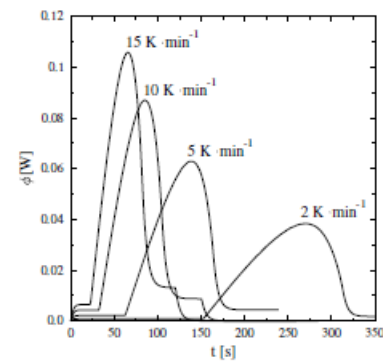
$$\Rightarrow C_p(T) = \frac{\phi(T_{plt})}{m \cdot \beta}$$

• Caractérisation : Calorimètre Différentiel à Balayage (DSC)

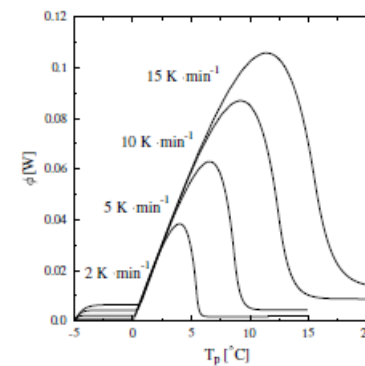


Corps pur

Influence de la vitesse



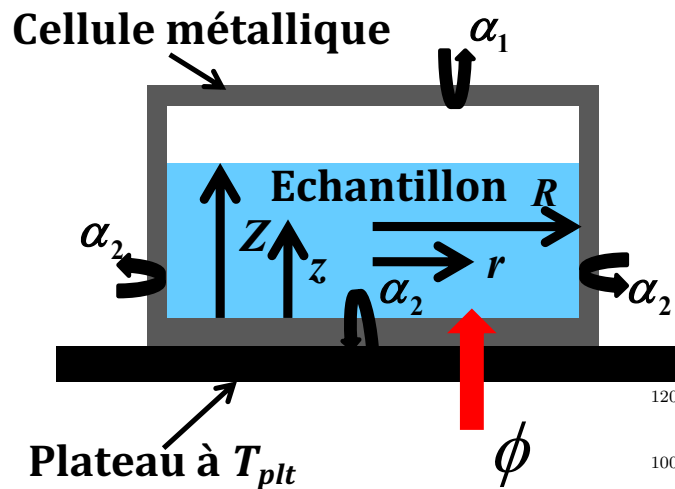
(a) abscisse en temps



(b) abscisse en température

• Caractérisation : Calorimètre Différentiel à Balayage (DSC)

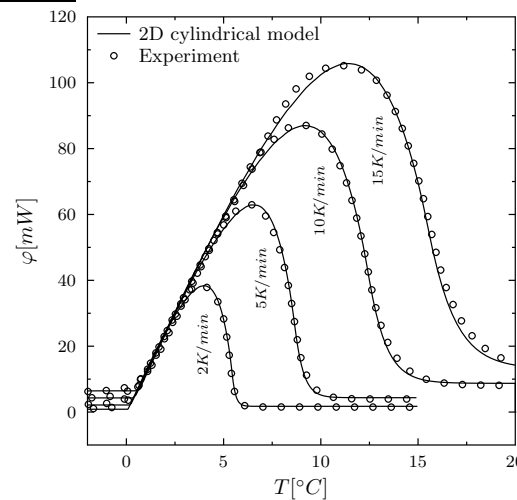
Corps pur



Modèle de la cellule

$$-k \vec{\nabla} T \cdot \vec{n} = \alpha_i (T_i - T_{plt}) \quad \forall S_i$$

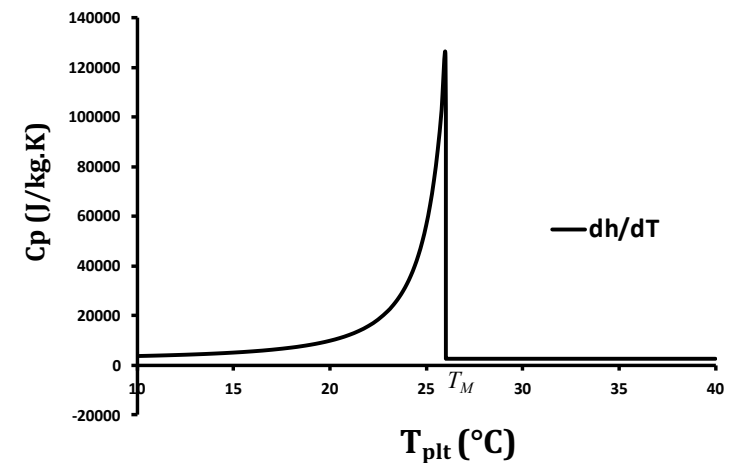
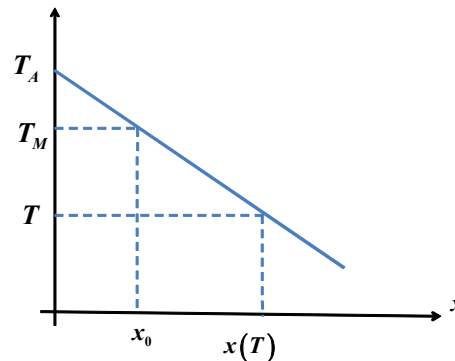
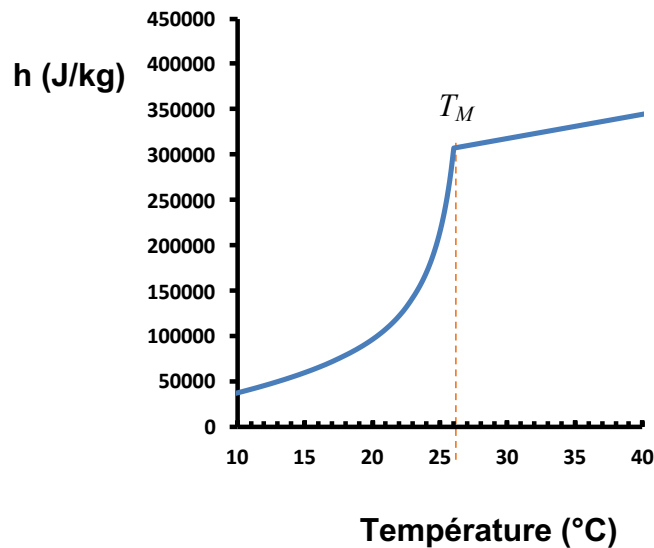
$$\phi(t) = \sum_i \alpha_i S_i (T_{plt}(t) - T_i)$$



$\Rightarrow$ Flux : $\phi(T_{ech})$

- **Caractérisation des MCP :**

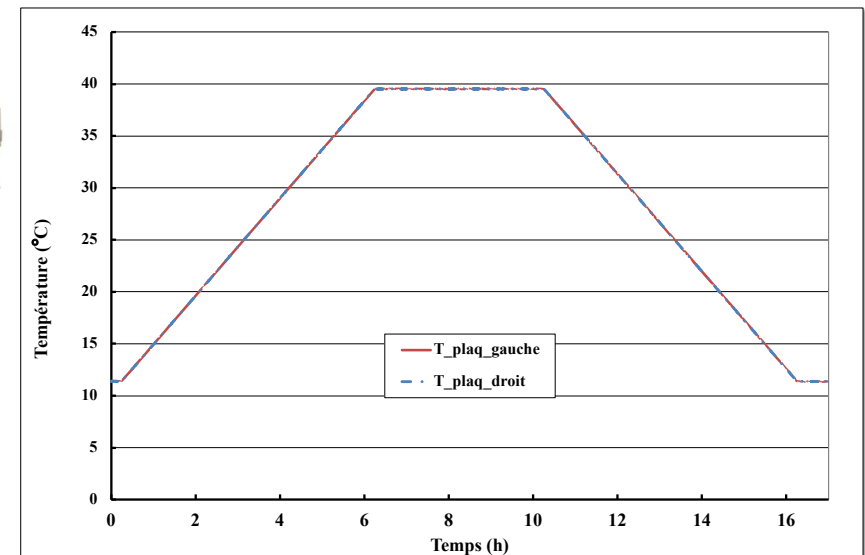
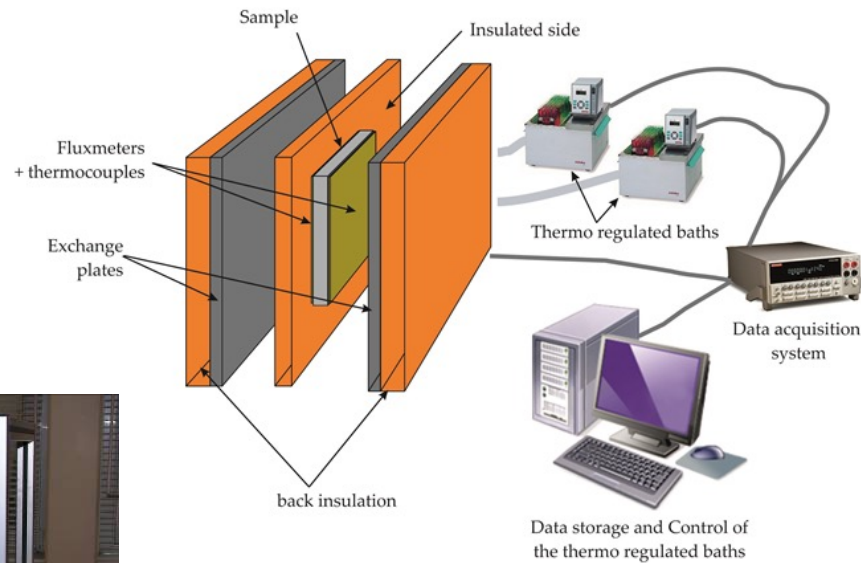
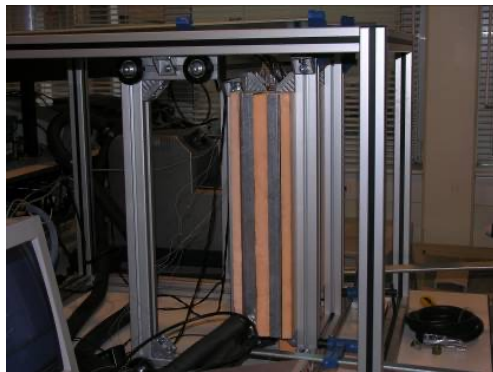
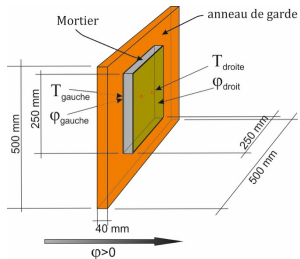
- **DSC : pas une méthode directe pour déterminer les propriétés du MCP**
- **Echantillons de quelques mg --> quid des matériaux composites ?**
- **La plupart des MCP ne sont pas purs**



- Caractérisation des MCP : **Banc fluxmétrique**

- Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)

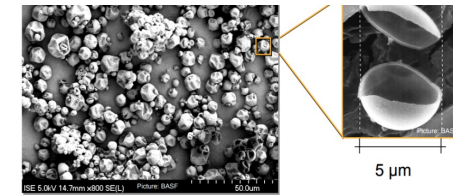
INSTRUMENTATION



- Caractérisation des MCP : **Banc fluxmétrique**

- Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)

Estimation : masse de MCP : 19% de la masse totale de matériau sec (MCP + ciment + sable)



Microbilles de paraffine - image microscopique
ref: CSTB, Laurence Le Stum BASF France



**Mortier + Micronal DS 5001 X
25 x 25 x 4 cm**

- M_1 : Masse de mortier "classique" = 5 kg ; $\rho_1 = 2000 \text{ kg/m}^3$

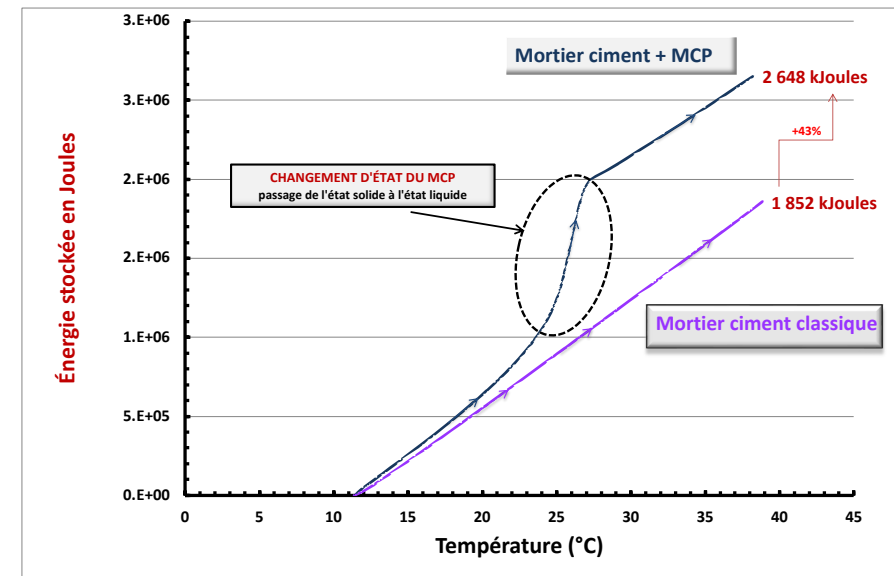
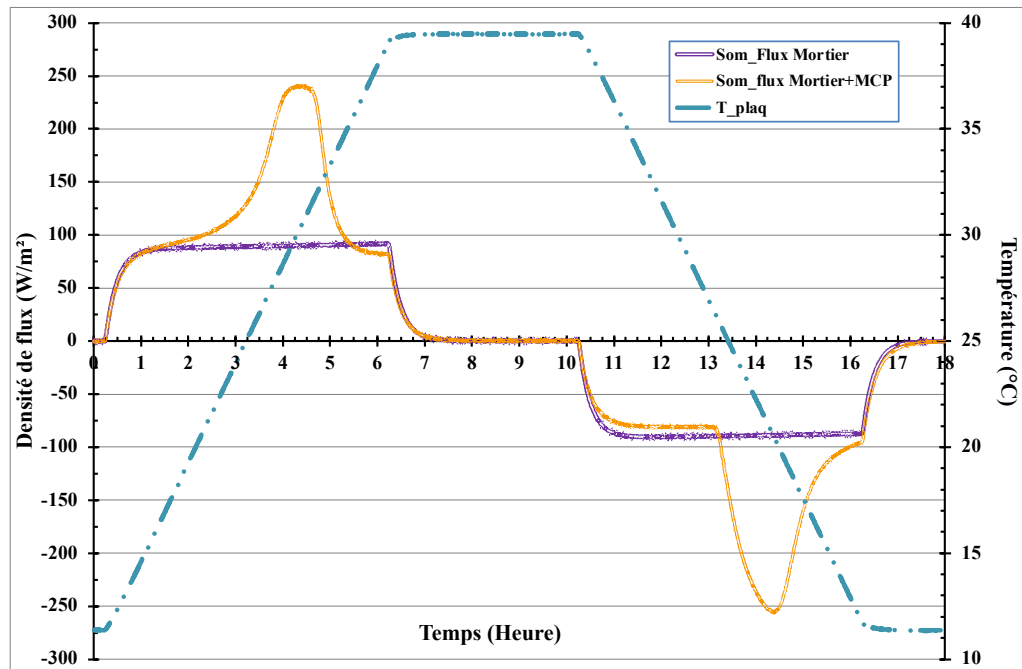


- M_2 : Masse du mortier avec MCP = 3,12 kg ; et $\rho_2 = 1256 \text{ kg/m}^3$



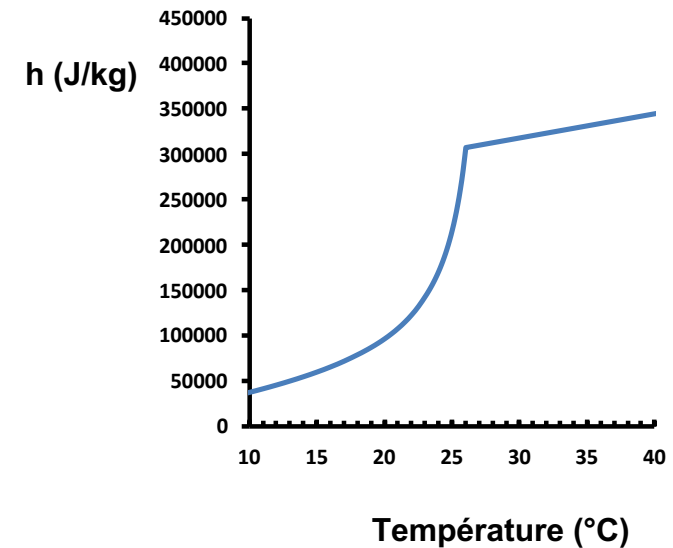
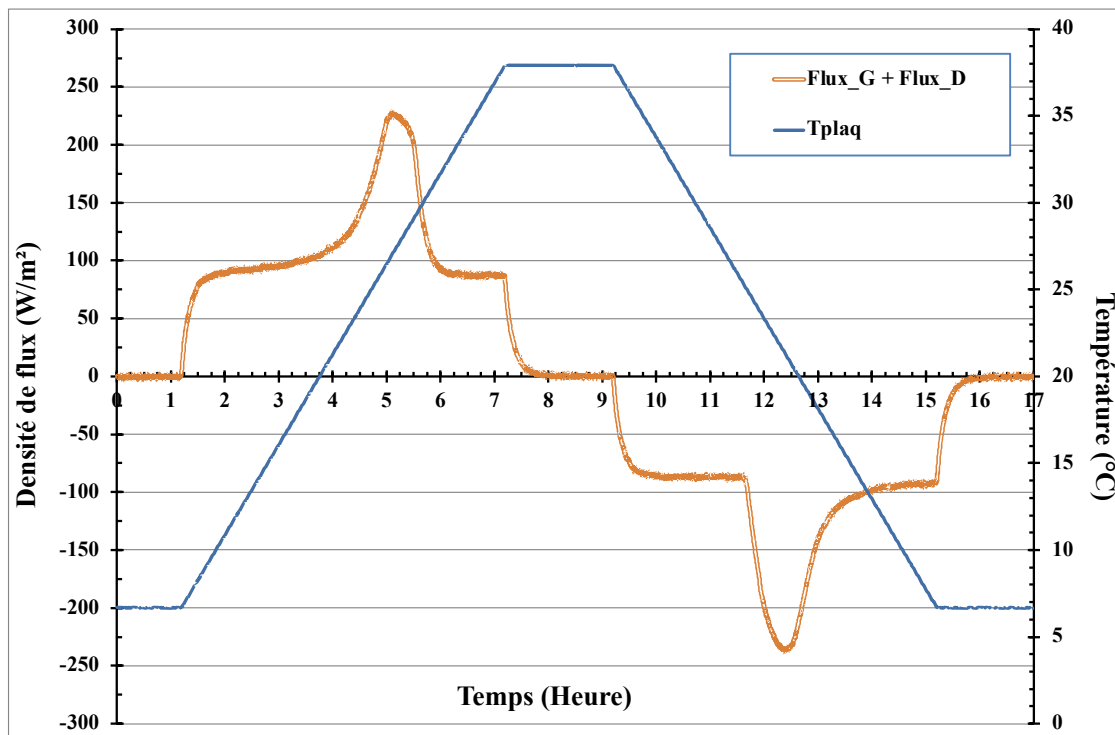
- Caractérisation des MCP : **Banc fluxmétrique**

- Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)



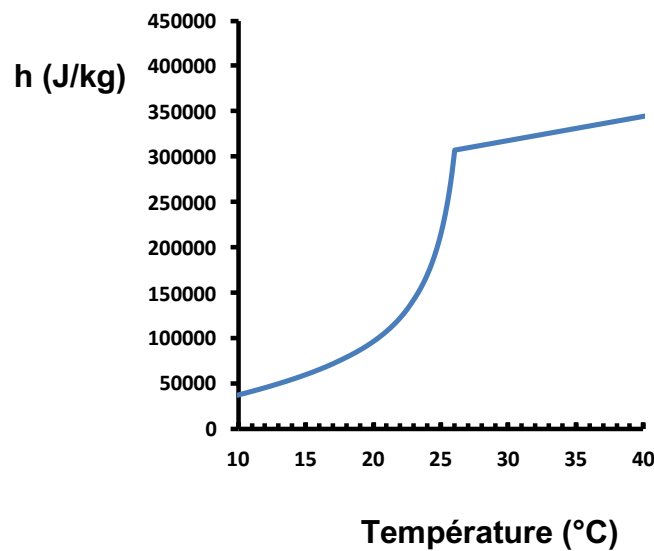
- Caractérisation des MCP : **Banc fluxmétrique**

- Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)



- Caractérisation des MCP : **Banc fluxmétrique**

- Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)



- **Comment déterminer $h(T)$?**

MCP est encapsulé dans de très petites particules

- ⇒ Le mortier composite est considéré comme un milieu homogène
- ⇒ L'échantillon est décrit par des propriétés moyennes, supposées isotropes
- ⇒ Tout effet de convection est négligé

Transfert thermique unidimensionnel

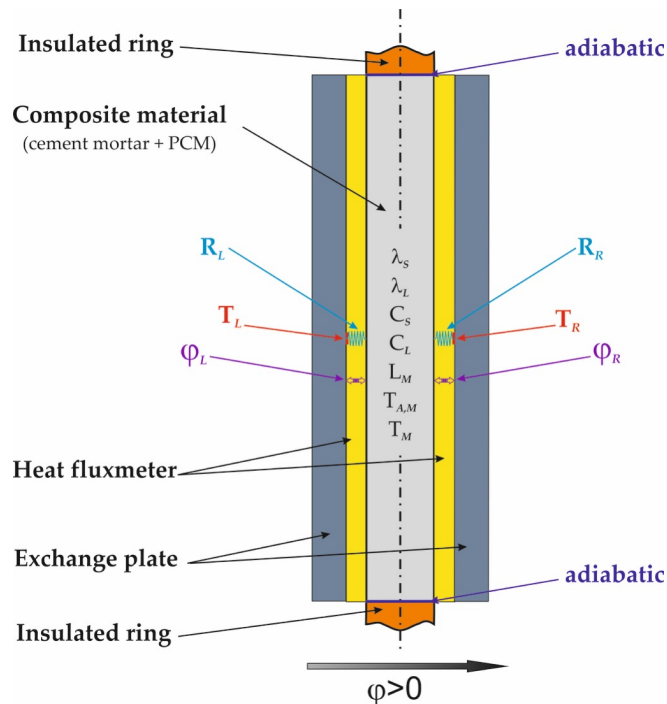
Le bilan énergétique est écrit dans un repère cartésien

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

• Caractérisation des MCP : Banc fluxmétrique

- Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)

○ Comment déterminer $h(T)$?



Conditions limites :

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{1}{R_G} (T_{x=0} - T_{p_G}(t)) \quad -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=X} = \frac{1}{R_D} (T_{x=X} - T_{p_D}(t))$$

Hypothèses :

- L'enthalpie massique est celle du matériau composite (mortier ciment + MCP)
- L'enthalpie du MCP est considérée comme celle d'une solution binaire

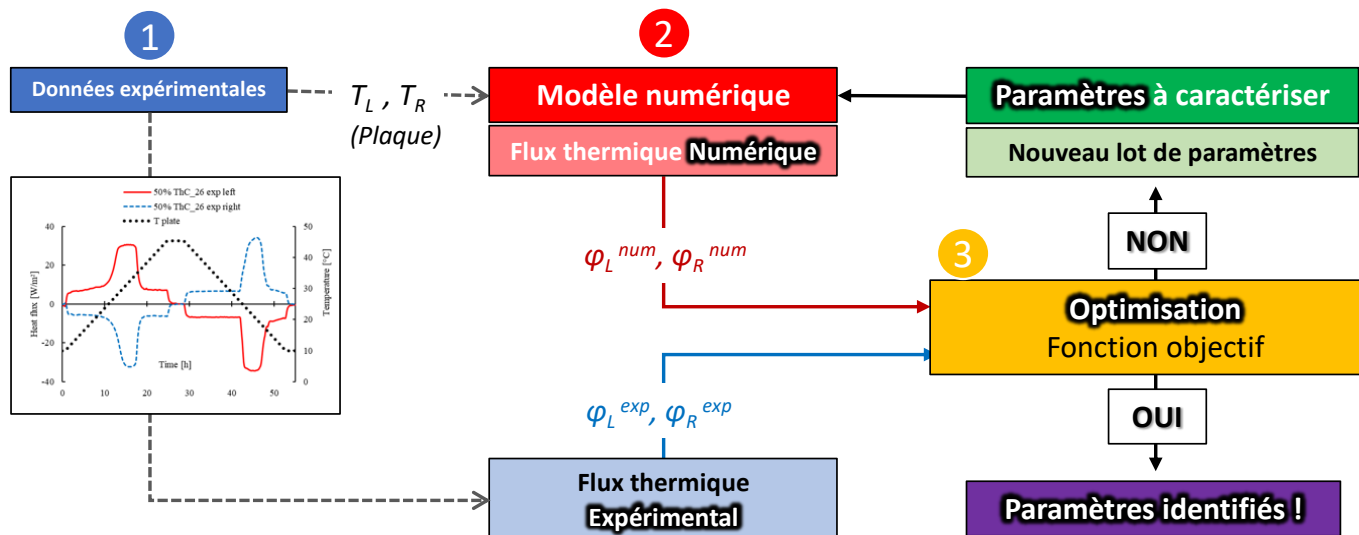
$$\frac{dh_{pcm}}{dT} = \begin{cases} c_{S,pcm} + (c_{L,pcm} - c_{S,pcm}) \left(\frac{T_A - T_M}{T_A - T} \right) - L_A \frac{T_A - T_M}{(T_A - T)^2} & \text{if } T < T_M \\ c_{L,pcm} & \text{if } T \geq T_M \end{cases}$$

• Caractérisation des MCP : **Banc fluxmétrique**

- Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)

○ **Comment déterminer $h(T)$?**

Méthode inverse



Minimisation d'une fonction objectif :

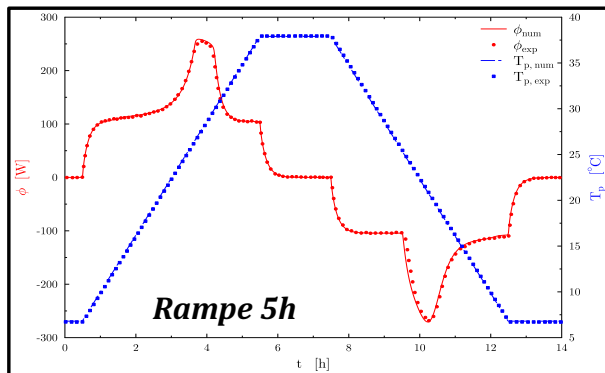
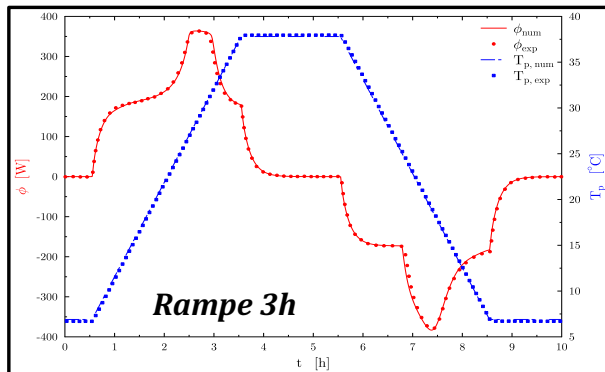
$$S = \sum_i (\phi_{exp} - \phi_{num})^2$$

- Méthode de Nelder–Mead (simplexe)
- Newton / Quasi-Newton (BFGS, L-BFGS)
- Algorithmes Génétiques

• Caractérisation des MCP : **Banc fluxmétrique**

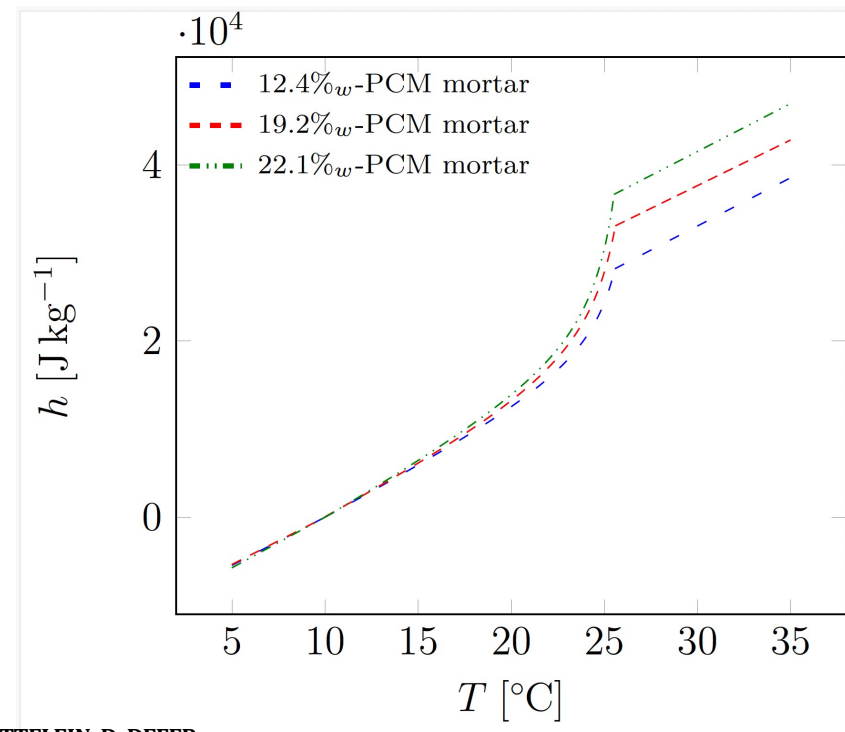
○ Matériau composite : Mortier "classique" & Mortier + MCP (microencapsulé)

○ **Comment déterminer $h(T)$?**



Mortier_MCP : 19% de MCP

$$\begin{aligned} R_G &= 1.39 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2 \\ R_D &= 3.2 \cdot 10^{-2} \text{ W}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{m}^2 \\ \lambda_S &= 0.43 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\ \lambda_L &= 0.44 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \\ c_S &= 1068 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \\ c_L &= 1033 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1} \\ L_A &= 18\,227 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \\ T_A &= 27.5 \text{ }^\circ\text{C} \\ T_M &= 25.7 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$



L. ZALEWSKI, E. FRANQUET, S. GIBOUT, P. TITTELEIN, D. DEFER

Efficient Characterization of Macroscopic Composite Cement Mortars with Various Contents of Phase Change Material
Applied Sciences. 9 (2019) 1104. <https://doi.org/10.3390/app9061104>

Matériaux biosourcés intégrant des matériaux à changement de phase pour une application dans le bâtiment

- **Objectif** : Développer un matériau à base de fibres végétales et d'un MCP biosourcé.

Pourquoi associer les deux ?

- **Fibres végétales** : Excellentes performances thermiques, hygroscopiques et acoustiques



Faible inertie thermique

- **MCP** : Stockage de chaleur, meilleure inertie thermique et maintien d'un environnement thermique confortable à l'intérieur.
- **Utilisations possibles** : Revêtement intérieur de bâtiment, isolation, plafond suspendu

Intégration du MCP : Quel impact sur résistance mécanique, transferts hydriques et sur capacité de stockage ?

Matériaux biosourcés intégrant des matériaux à changement de phase pour une application dans le bâtiment

- **Objectif :** Développer un matériau à base de fibres végétales et d'un MCP biosourcé.

Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26



Chanvre



Enduit Thermoconfort 26

Enduit THERMOCONFORT est un enduit intérieur à base de plâtre intégrant 75% de MCP biosourcés et microencapsulés ; Température changement état = 26°C

Problèmes initiaux : Malléabilité à l'état frais, apparition moisissures

Méthodologie :

Fabrication selon formulation ; Démoulage (3 j) ; Vérification de la moisissure (5 j) ; Evaluation de la résistance mécanique ; Caractérisation thermique et MBV après 28 jours

Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Correction des problèmes :

- Malléabilité ➡ ajout de superplastifiant végétal (Sika ViscoCrete)
- Moisissure ➡ ajout de chaux et ajustement de la quantité d'eau
- Résistance ➡ ajout de chaux



Thermoconfort 26, chanvre et chaux

Composant (% masse sèche)	0% ThC26	33% ThC26	50% ThC26	60% ThC26	66% ThC26
ThC 26	-	18,3	30,8	40	43
Chanvre	22,3	18,3	15,5	13,4	14,3
Chaux NHL5	22,3	18,3	15,5	13,4	7,1
Eau	55,4	45,1	38,2	33,2	35,6

Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Types d'échantillons fabriqués :

Plaques 25x25x5 cm



Thermique

Cubes 10x10x10 cm



MBV

Prismes 4x4x16 cm



Mécanique : Flexion
et compression

Plaques 40x40x4 cm



Plaque grande dimension

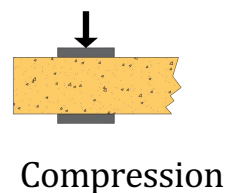
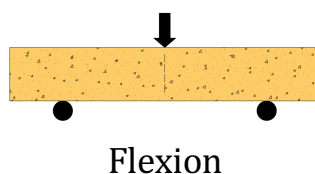
Cylindres 11x22 cm



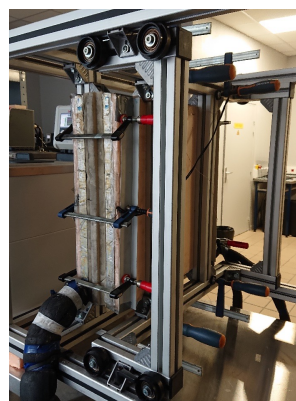
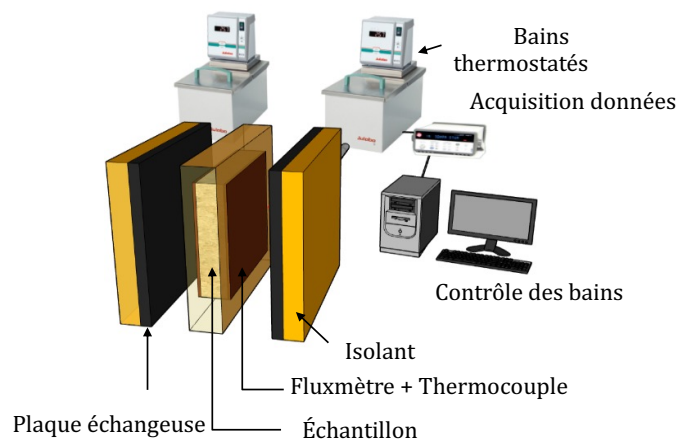
Mécanique : compression

Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Mécanique



Thermique

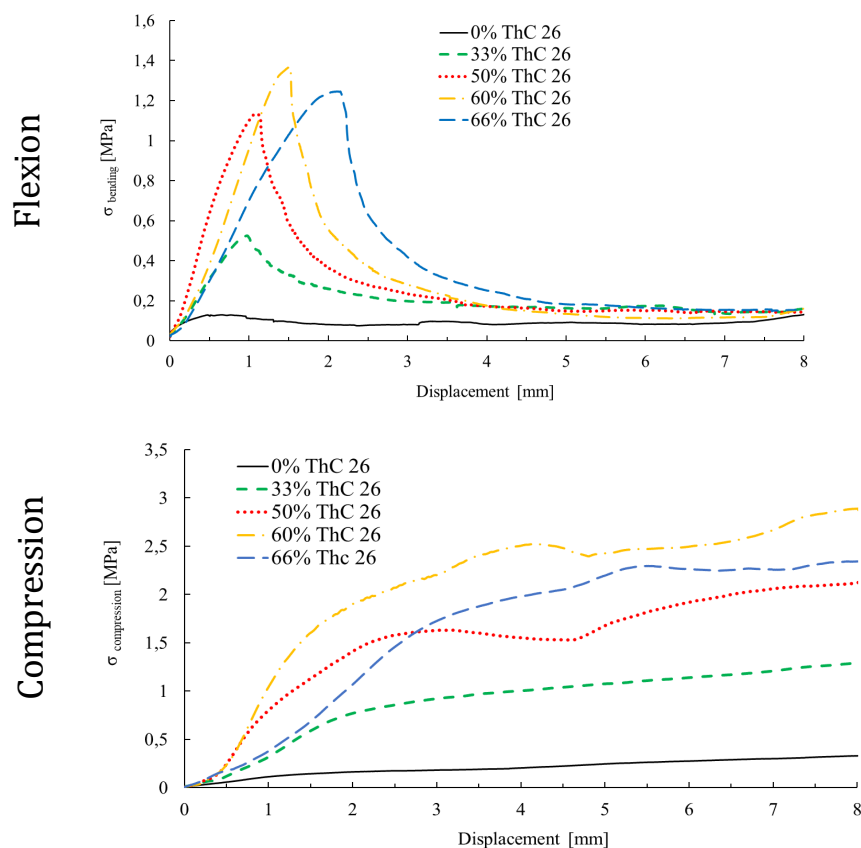


Hydrique MBV



Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Mécanique

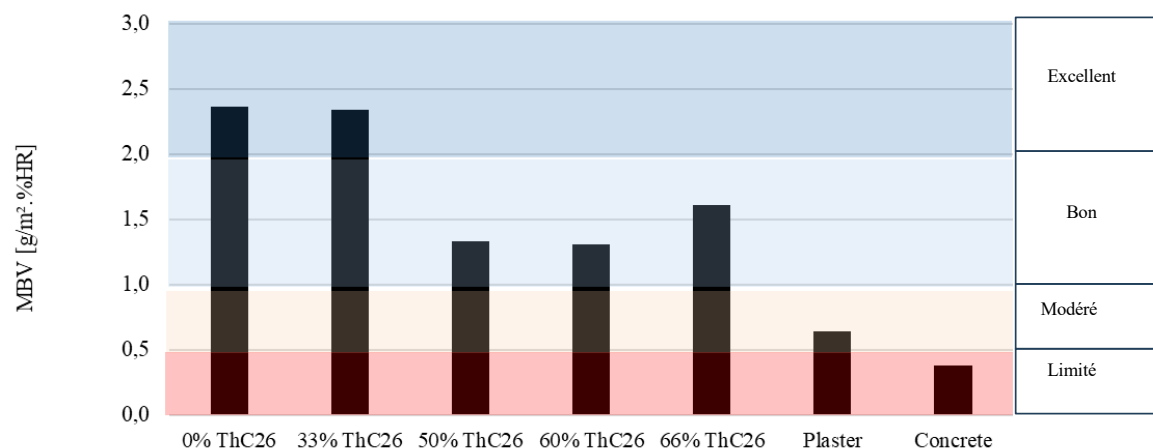


Formulation	ρ [kg/m ³]	$\sigma_{bending}$ (MPa)	$\sigma_{compression}$ (MPa)
0% ThC_26	296	0,13	0,32
[Cerezo et al.]	460	-	0,76
[Elfordy et al.]	294 - 601	0,75 - 1,2	0,18 - 0,85
[CEBTP]	495	-	1,46
33% ThC_26	373	0,56	1,25
50% ThC_26	434	1,21	2,14
60% ThC_26	459	1,34	2,83
66% ThC_26	421	1,24	2,39

L'ajout de MCP augmente la masse volumique du matériau composite et sa résistance mécanique

Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Hydrique / Moisture Buffer Value (MBV)

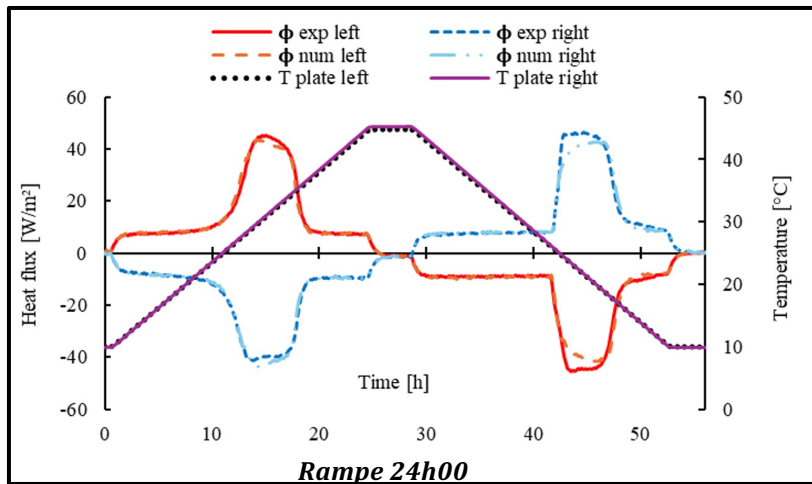


Formulation	Densité [kg/m³]	épaisseur [m]	Surface exposée [m²]	MBV [g/m².%HR]
0% ThC_26	296	0.10	0.01	2.36
33% ThC_26	373	0.10	0.01	2.34
50% ThC_26	434	0.10	0.01	1.33
60% ThC_26	459	0.10	0.01	1.30
66% ThC_26	421	0.10	0.01	1.61

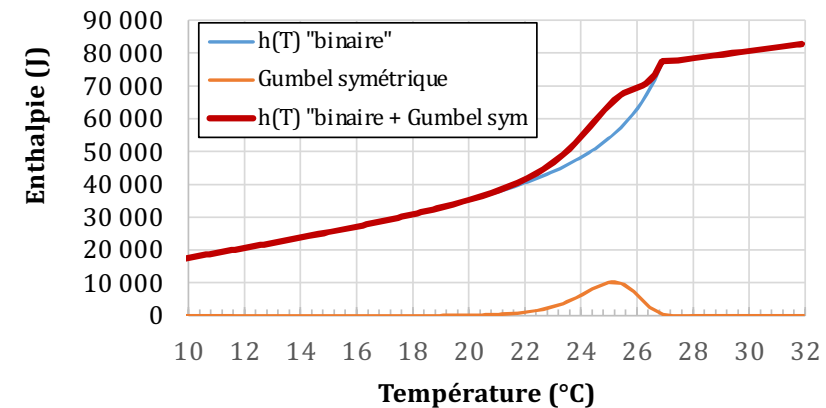
L'ajout de MCP réduit la capacité d'un matériau à échanger de l'humidité avec son environnement mais le MBV reste "excellent" pour 33% et "bon" pour les % supérieurs

Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Thermique



1. Modèle d'une solution binaire pour expression de l'enthalpie n'est adapté $\Rightarrow$ Ajout d'une fonction : fonction de Gumbel inverse



$$\frac{dh_{mcp}}{dT} = \begin{cases} C_{solid} \cdot \left(1 - \frac{T_{Am} - T_{Mm}}{T_{Am} - T}\right) + C_{liquid} \cdot \left(\frac{T_{Am} - T_{Mm}}{T_{Am} - T}\right) + \left(\frac{T_{Am} - T_{Mm}}{T_{Am} - T}\right) \cdot \left(\frac{\Psi_{fusion} \cdot L_A}{T_{Am} - T}\right) + f_{Gumbel_fusion}(T) & T \leq T_M \\ C_{liquid} & T \geq T_M \end{cases}$$

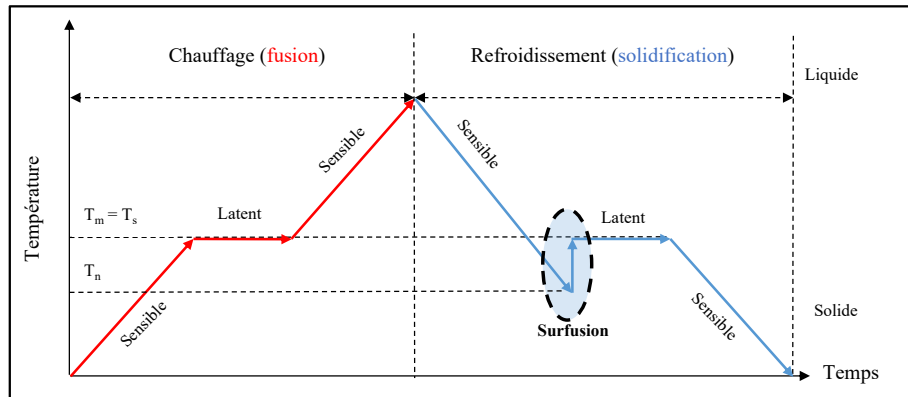
$$f_{Gumbel_fusion}(T) = \left(\frac{1}{b_m} \exp\left(-\exp\left(\frac{T - a_m}{b_m}\right)\right) \cdot \exp\left(\frac{T - a_m}{b_m}\right) \right) \cdot (1 - \Psi_{fusion}) \cdot L_A$$

$\Rightarrow$ 14 paramètres à estimer

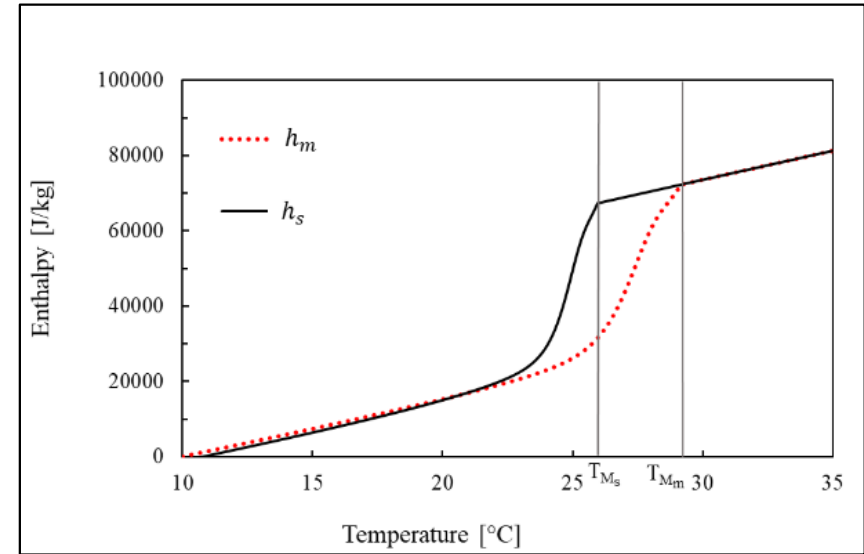
Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Thermique

Phénomène de surfusion



Surfusion pour un corps pur



$$\frac{dh_{mcp}}{dT} = \begin{cases} c_{solid} \cdot \left(1 - \frac{T_{As} - T_{Ms}}{T_{As} - T}\right) + c_{liquid} \cdot \left(\frac{T_{As} - T_{Ms}}{T_{As} - T}\right) + \left(\frac{T_{As} - T_{Ms}}{T_{As} - T}\right) \cdot \left(\frac{\Psi_{solid} \cdot L_A}{T_A - T}\right) + f_{Gumbel_solid}(T) & T \leq T_M \\ c_{liquid} & T \geq T_M \end{cases}$$

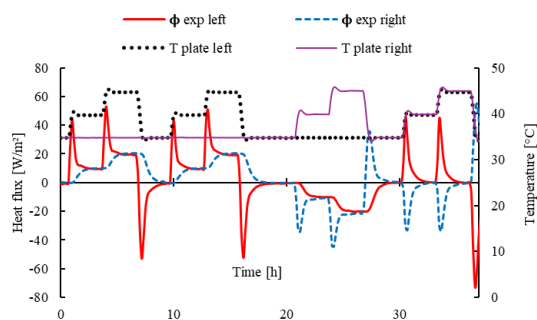
$$f_{Gumbel_solid}(T) = \left(\frac{1}{b_s} \exp\left(-\exp\left(\frac{T - a_s}{b_s}\right)\right) \cdot \exp\left(\frac{T - a_s}{b_s}\right) \right) \cdot (1 - \Psi_{solid}) \cdot L_A$$

⇒ 5 paramètres de plus à estimer ($T_{As}, T_{Ms}, a_s, b_s, \Psi_s$)

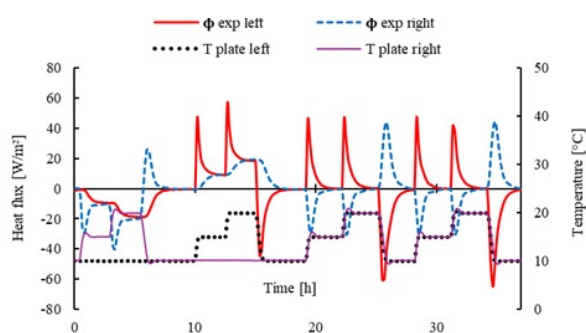
Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Thermique Identification "par partie"

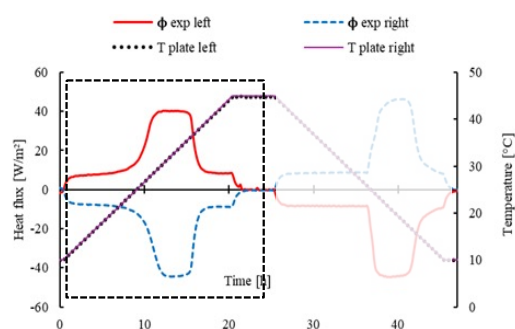
$\lambda_L, c_L, R_{cL}^L, R_{cR}^L$



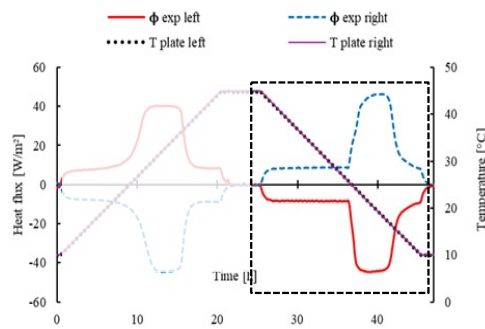
$\lambda_S, c_S, R_{cL}^S, R_{cR}^S$



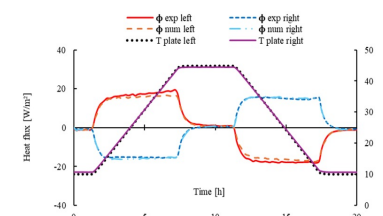
$T_{A_m}, T_{M_m}, a_m, b_m, \psi_m, L_A$



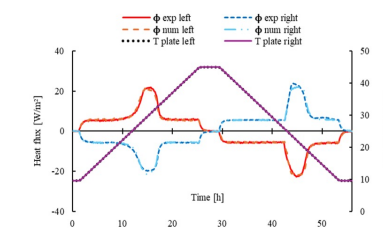
$T_{A_s}, T_{M_s}, a_s, b_s, \psi_s$



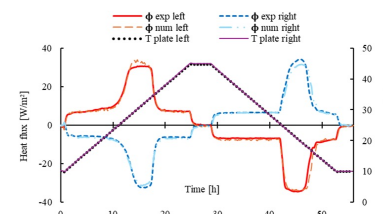
0% ThC_26



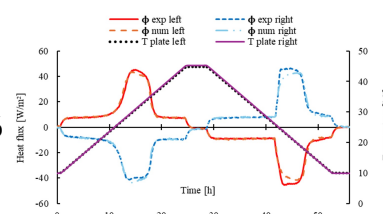
33% ThC_26



50% ThC_26



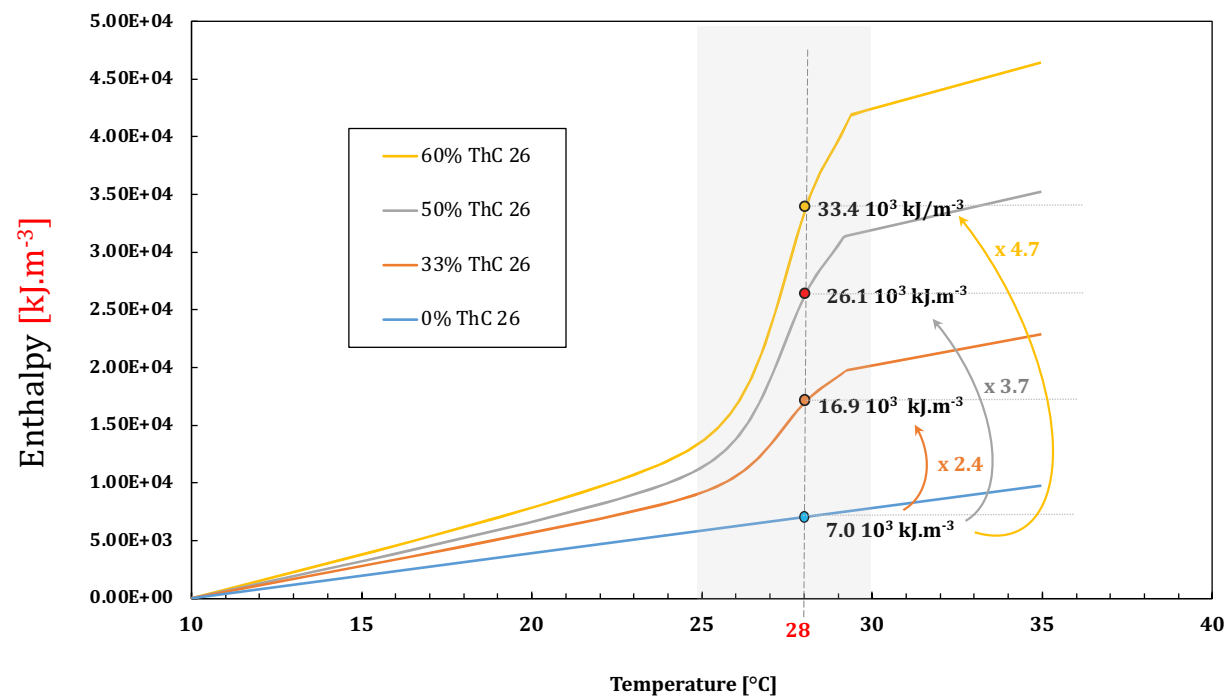
60% ThC_26



Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Thermique

Résultats



L'ajout de MCP augmente très sensiblement la capacité de stockage d'énergie

Mélange chènevotte et un Enduit Thermoconfort 26

Synthèse

Mécanique

A conforter : mise en œuvre $\Rightarrow$ compactage normalisé

Hydrique / Moisture Buffer Value (MBV)

Intégration de MCP ne semble pas impacter ce paramètre dans la limite des 30%

Thermique

L'ajout de MCP augmente très sensiblement la capacité de stockage d'énergie

Paramètres à explorer

- $\Rightarrow$ Vieillissement MCP ; fuite dans matrice
- $\Rightarrow$ Impact sur qualité de l'air
- $\Rightarrow$ Recyclabilité des matériaux composites $\Rightarrow$ ACV
- $\Rightarrow$ "hystérésis" $\Leftrightarrow$ surfusion : impact sur simulations numériques et de fait sur estimation des bilans énergétiques lors des fusions/solidifications partielles
- $\Rightarrow$ Impact du changement de phase (thermique) sur transferts hydriques