

Modélisation analytique d'un stockage thermocline pour la récupération de chaleur fatale ou pour centrale solaire à concentration



Régis OLIVES^(1*) & Aubin TOUZO⁽²⁾

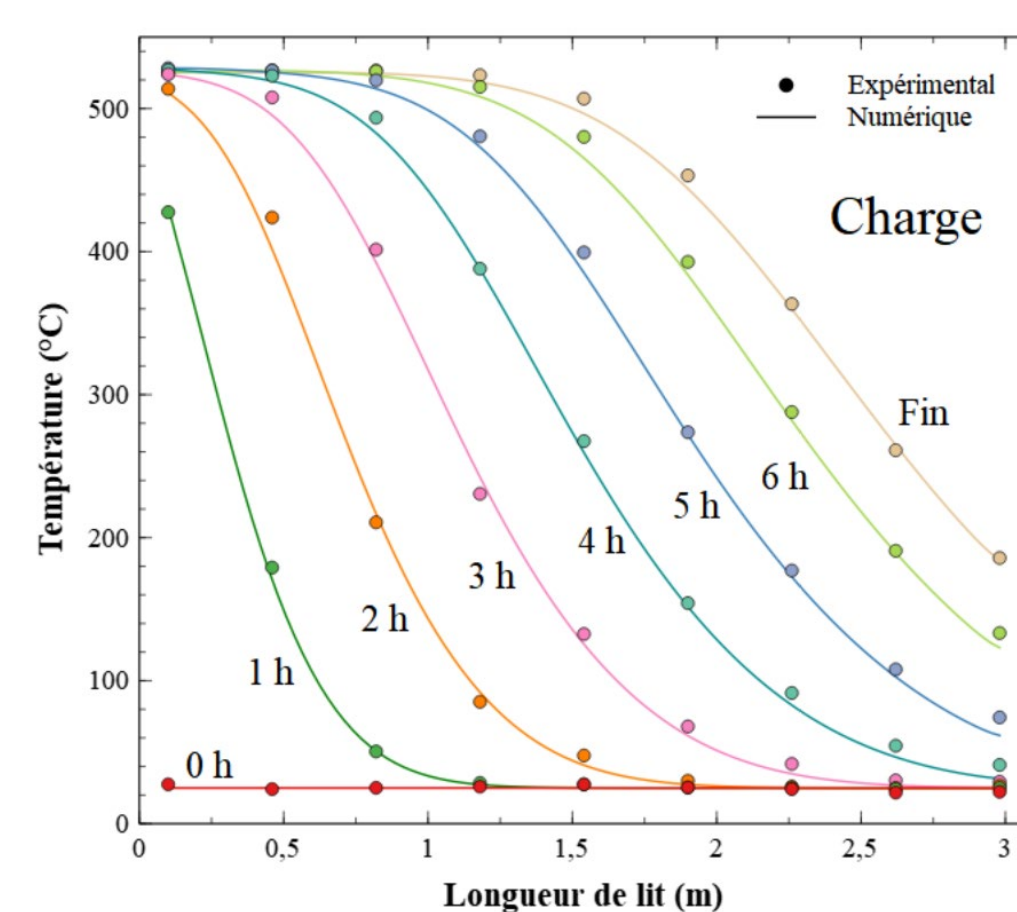
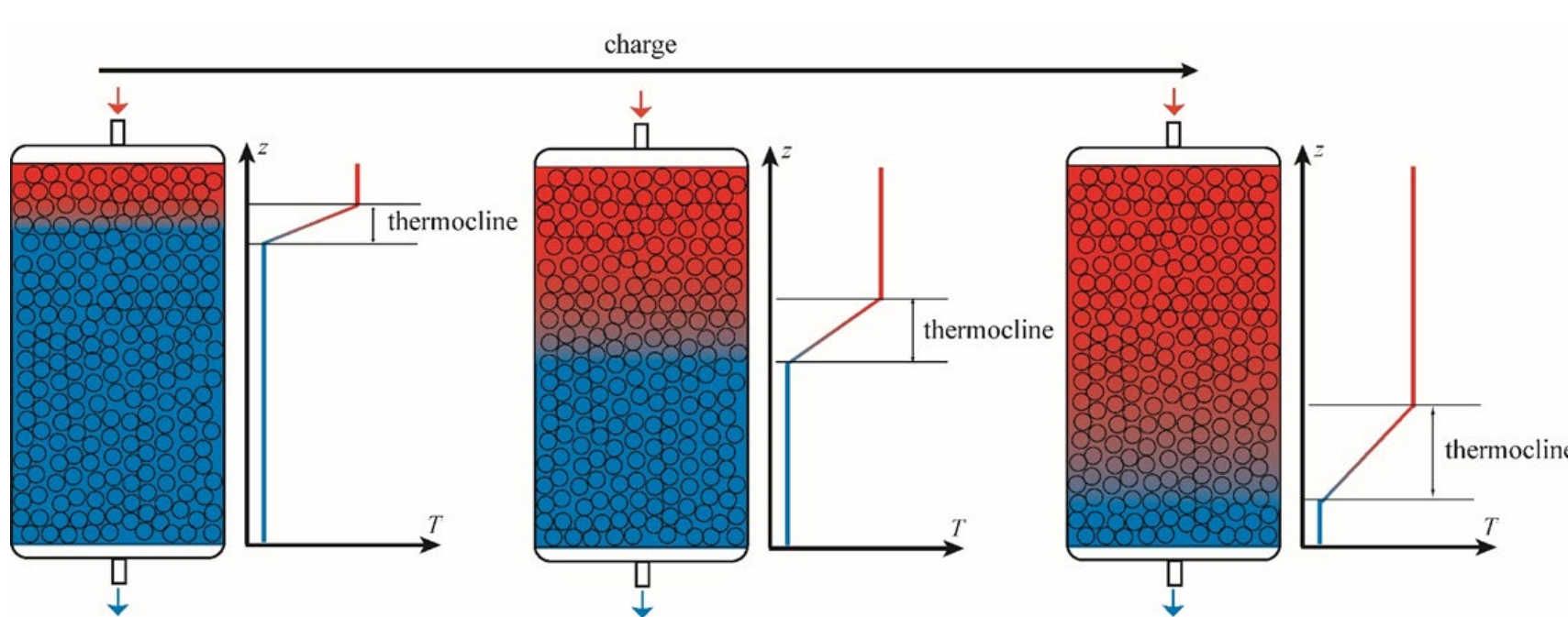
Introduction

Le stockage thermique de type thermocline peut être utilisé pour la valorisation de chaleurs fatales industrielles ou dans les centrales solaires à concentration en remplacement du stockage deux cuves à sel fondu. Nous présentons une méthode de résolution basée sur la double transformée de Laplace conduisant à la solution analytique du modèle à deux températures (modèle de Schumann). Aussi, un modèle du stockage basé sur un ensemble de filtres placés en série est proposé. Le stockage est ainsi divisé en sous parties d'une longueur caractéristique correspondant à un filtre d'ordre 1 et possédant une dynamique thermique donnée par un temps caractéristique. La température du fluide ainsi modélisée est comparée aux résultats expérimentaux obtenus sur une installation de taille industrielle qui est destinée à la récupération et la valorisation de chaleur fatale (Ecostock®). Il s'agit ainsi de proposer un modèle suffisamment simple pour aider au dimensionnement et à son optimisation lorsqu'il est, par exemple, intégré dans un réseau multi-énergies.

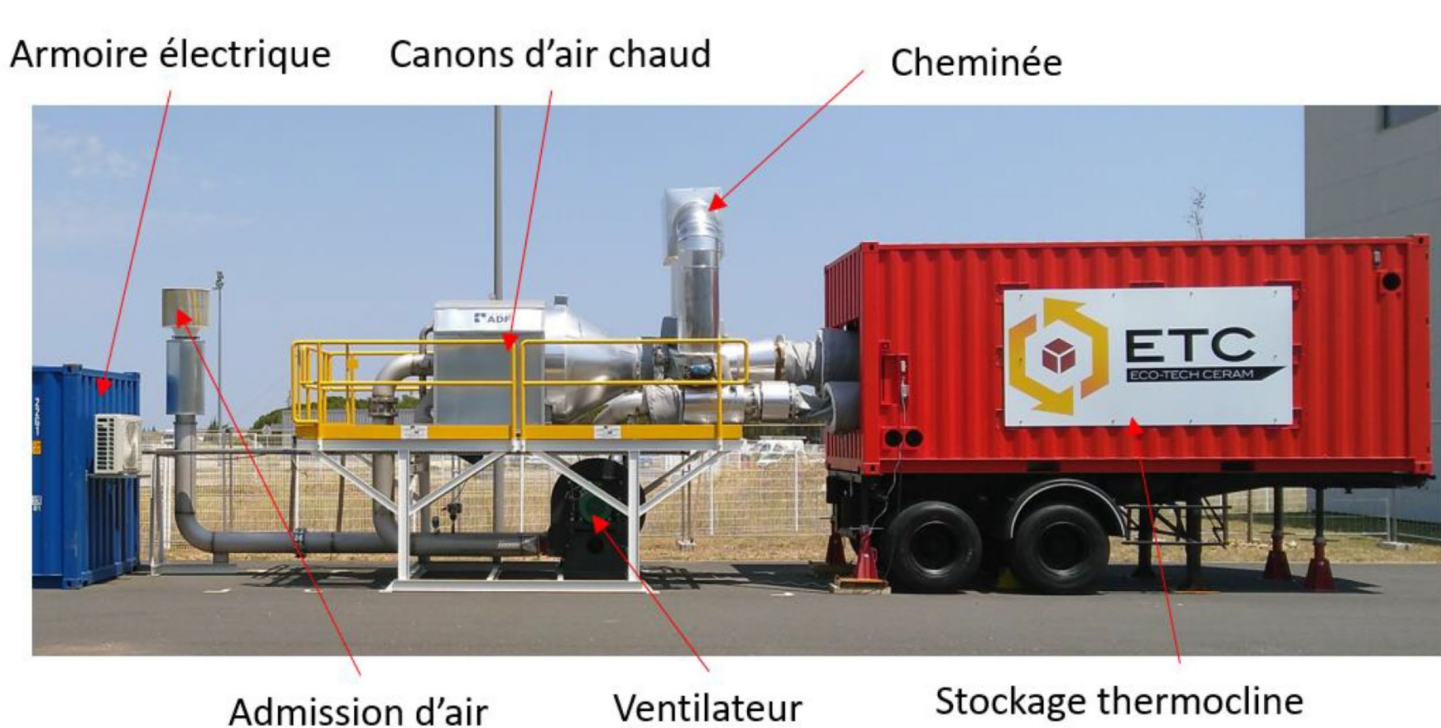
Stockage thermocline

Fonctionnement et banc expérimental

Fonctionnement



L'Ecostock® :



Capacité de stockage : 1.9 MWh_{th} (à 525°C)
 Puissance de charge : 300 kW_{th}
 Dimension de la cuve : 3.08 x 1.70 x 1.70 m³
 Matériaux : 16 tonnes de bauxite particules de Ø 30 mm, porosité : 40%

Modélisation

Modèle à 2 températures (Schumann) :

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{NUT}{L}(T_s - T_f) - \frac{m_f}{\dot{m}_f L} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad NUT = St \frac{S_{exch}}{S_{flow}} \quad St = \frac{h \cdot S_{flow}}{\dot{m}_f \cdot C_f}$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = NUT \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} (T_f - T_s)$$

C.L. & C.I. : $T_s(x, 0) = T_f(x, 0) = T_{s0}$ et $T_f(0, t > 0) = T_{f,in}$

Modèle adimensionnalisé :

$$\begin{cases} \frac{\partial T_f^*}{\partial \chi} = T_s^* - T_f^* \\ \frac{\partial T_s^*}{\partial \tau} = T_f^* - T_s^* \end{cases} \quad T^* = \frac{T - T_{s0}}{T_{f,in} - T_{s0}}, \quad \chi = x \cdot \frac{NUT}{L} \quad \text{et} \quad \tau = NUT \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} \left[t - \frac{m_f x}{\dot{m}_f L} \right]$$

C.L. & C.I. : $T_s^*(\chi, 0) = T_f^*(\chi, 0) = 0$ et $T_{f,in}^* = 1$

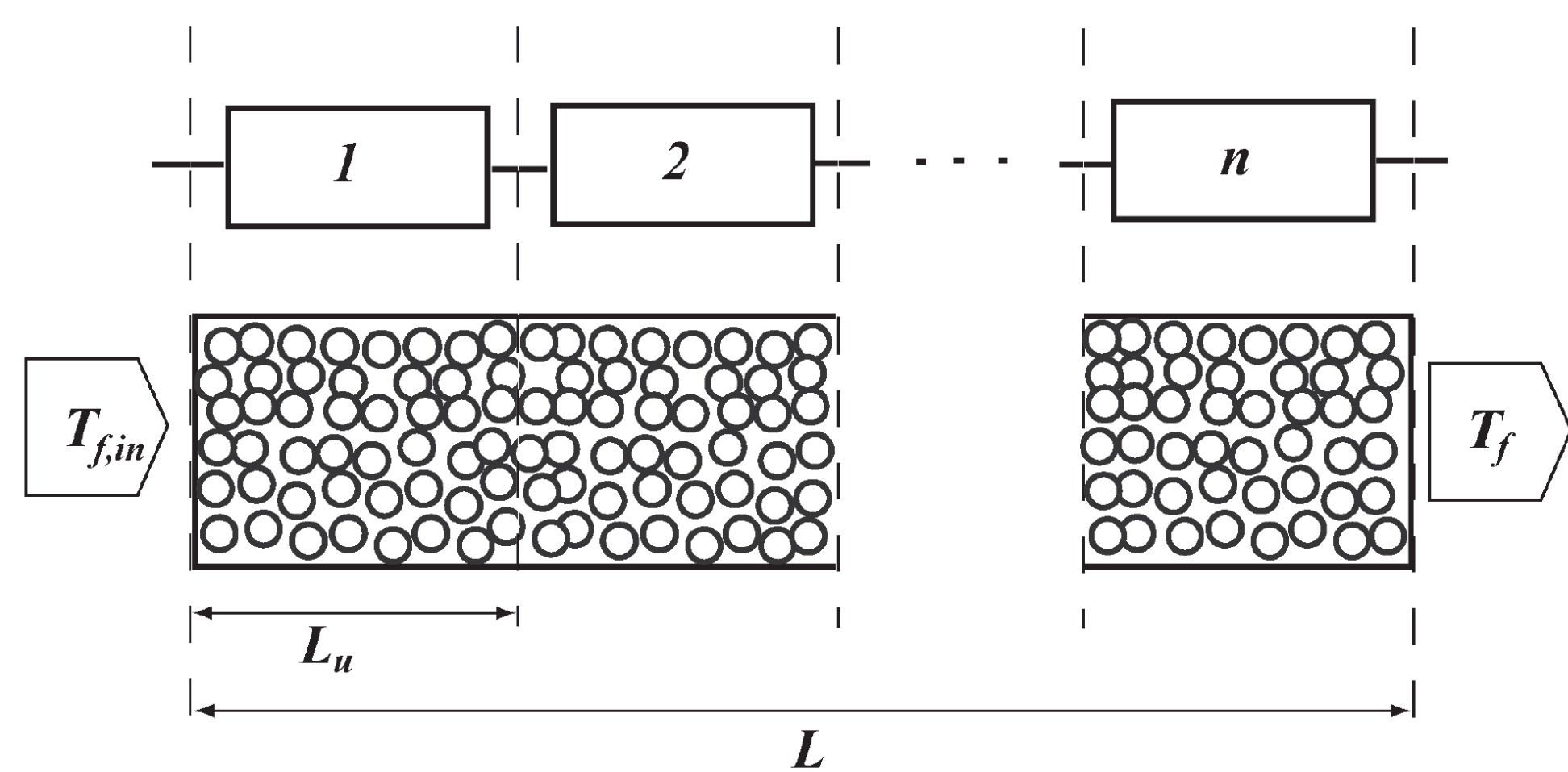
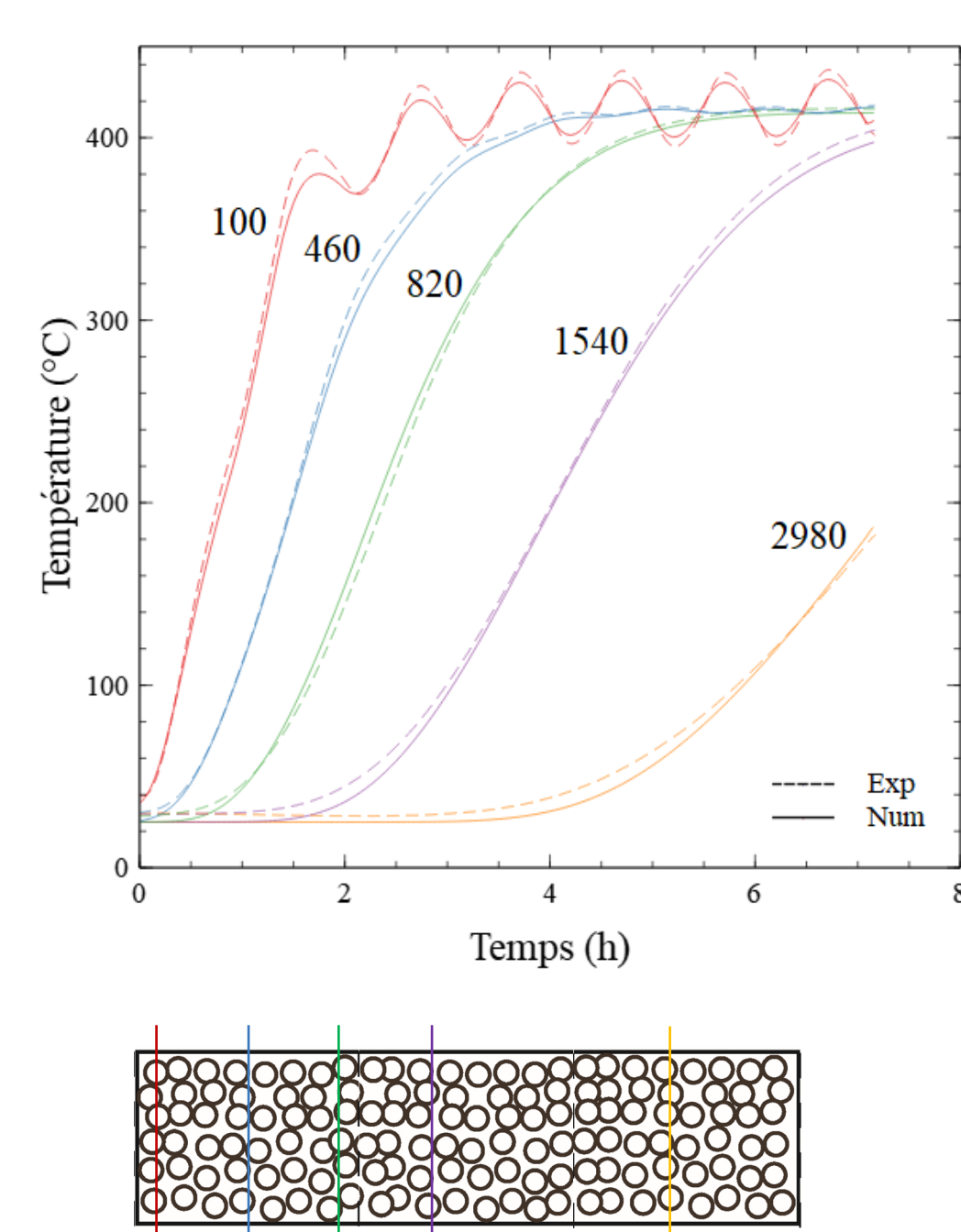
Application de la double transformée de Laplace en espace et en temps

$$\begin{cases} L_t L_x \left\{ \frac{\partial T_f^*}{\partial \chi} \right\} = L_t L_x \{ (T_s^* - T_f^*) \} \\ L_t L_x \left\{ \frac{\partial T_s^*}{\partial \tau} \right\} = L_t L_x \{ (T_f^* - T_s^*) \} \end{cases} \quad \begin{cases} \overline{\overline{T_f^*}}(p, s) = \frac{1}{s(p + \frac{s}{s+1})} \\ \overline{\overline{T_s^*}}(p, s) = \frac{1}{s(s+1)(p + \frac{s}{s+1})} \end{cases} \quad \begin{cases} T_f^*(\chi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \int_0^\chi e^{-\xi} I_0(2\sqrt{\xi \cdot \tau}) d\xi \\ T_s^*(\chi, \tau) = e^{-\chi} \int_0^\tau e^{-\eta} I_0(2\sqrt{\chi \cdot \eta}) d\eta \end{cases}$$

$\overline{\overline{T_s^*}}(p, 0) = 0$ et $\overline{\overline{T_f^*}}(0, s) = \frac{1}{s}$

Modélisation et comparaison avec les résultats expérimentaux

Stockage thermocline = un ensemble de n filtres en série :



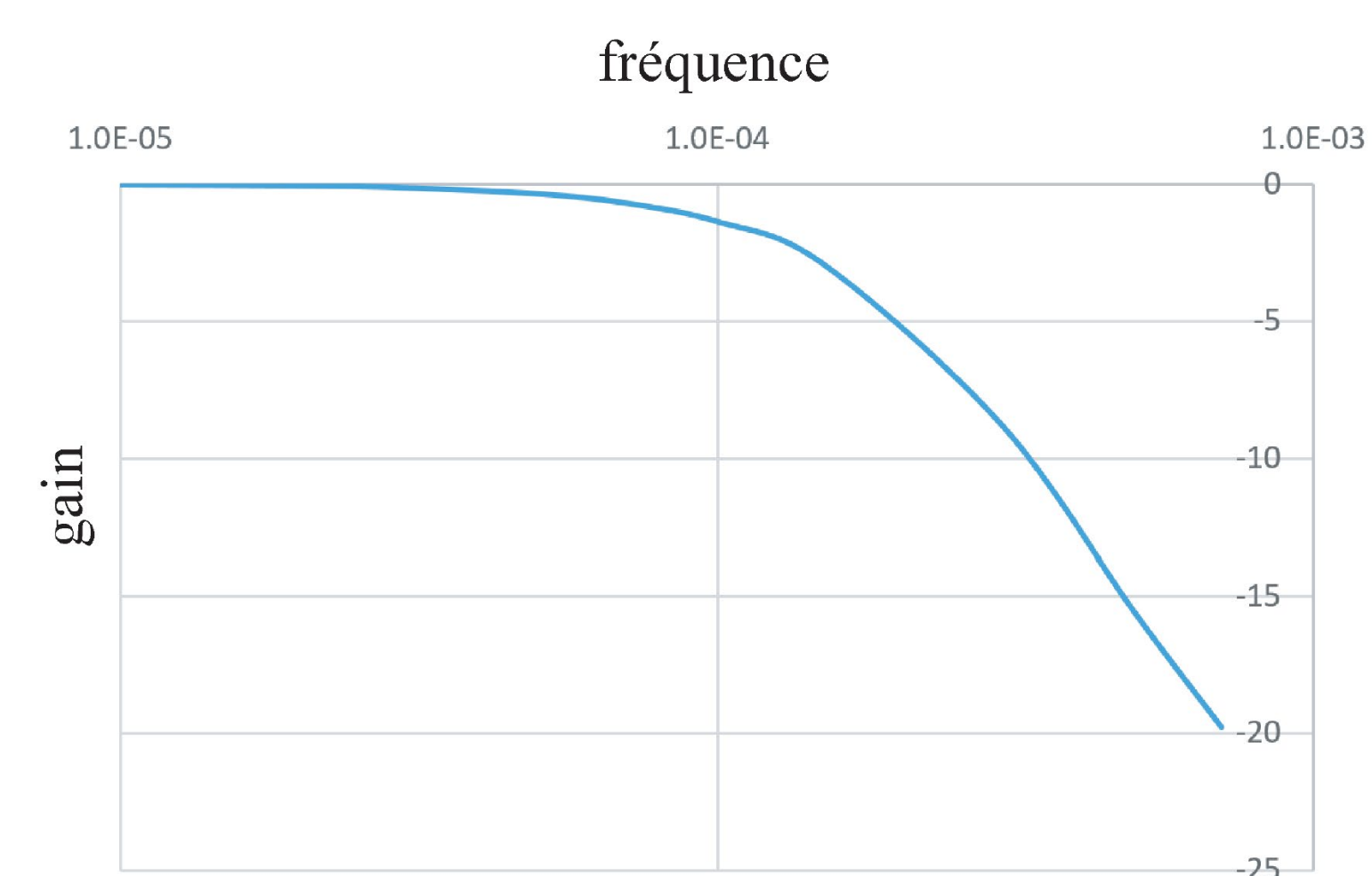
Stockage en tant que filtre :

- d'ordre 1 $T_f^*(\tau) = 1 - e^{-\tau}$

- d'ordre 2 $T_f^*(\tau) = 1 - (1 + \tau)e^{-\tau}$

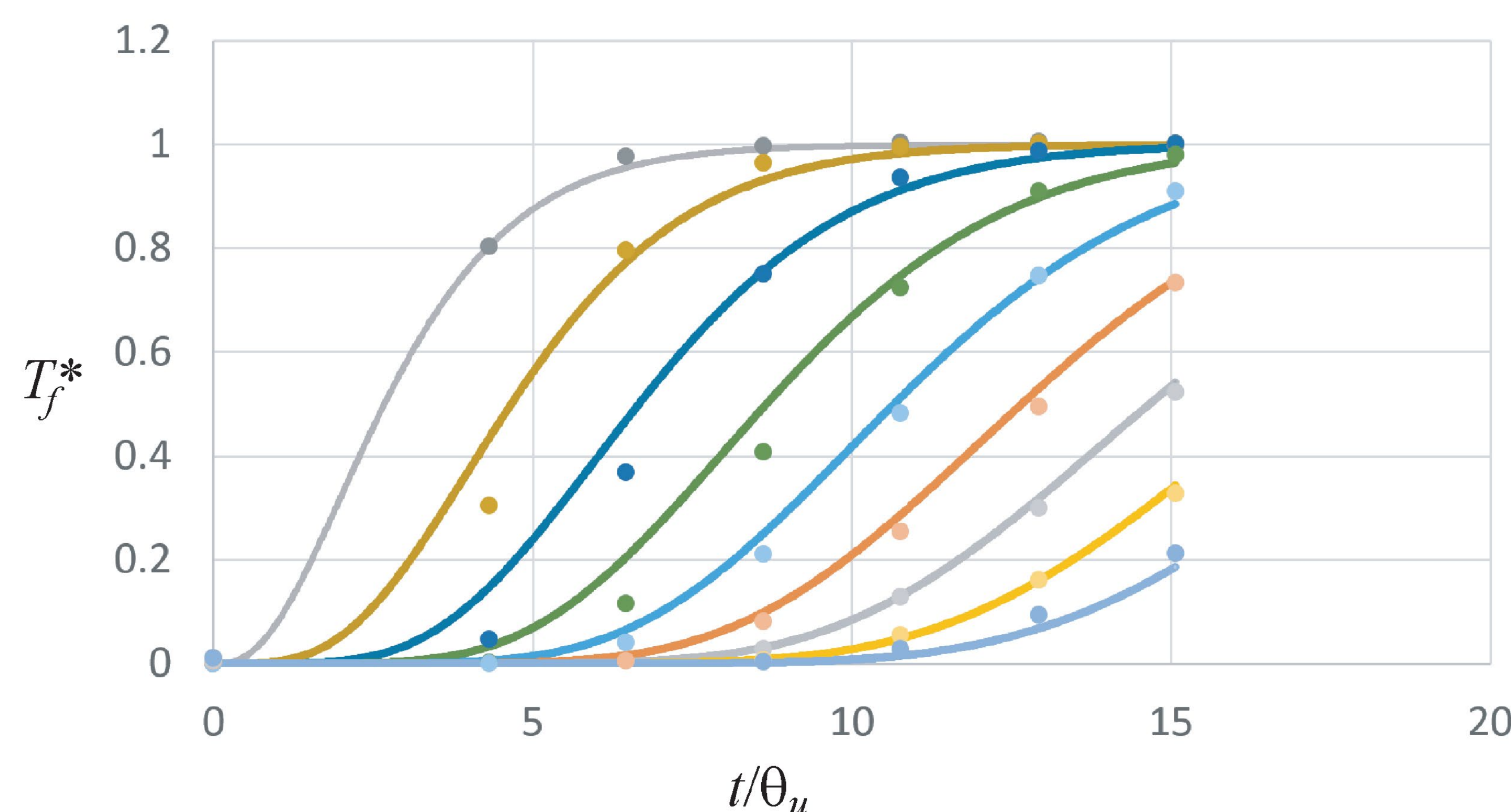
- d'ordre n $T_f^*(\tau) = 1 - e_{n-1}(\tau) \cdot e^{-\tau}$

Diagramme de Bode d'une épaisseur de lit de particules de 18 cm d'épaisseur :



- amortissement des variations du signal d'entrée
- effet de filtrage du milieu poreux

Comparaison entre les profils de température expérimentaux (points) et issus du modèle de filtres en série (courbes) :



Longueur unité

$$L_u = 0,18 \text{ m}$$

NUT unité

$$NUT_u = \frac{6 \cdot h \cdot (1 - \epsilon) \cdot L_u \cdot S}{\dot{m}_f C_f D}$$

Temps caractéristique unité

$$\theta_u = 2,8 \frac{\rho_s C_s D}{6 \cdot h \cdot (1 - \epsilon)}$$

Conclusion :

Méthode de résolution basée sur la double transformée de Laplace en espace et en temps

Modèle du stockage thermocline basé sur un ensemble de filtres en série

→ Aide au dimensionnement

→ Optimisation et pilotage en régime dynamique

→ Intégration du stockage thermique à un réseau multi-énergie ou à une centrale solaire