



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

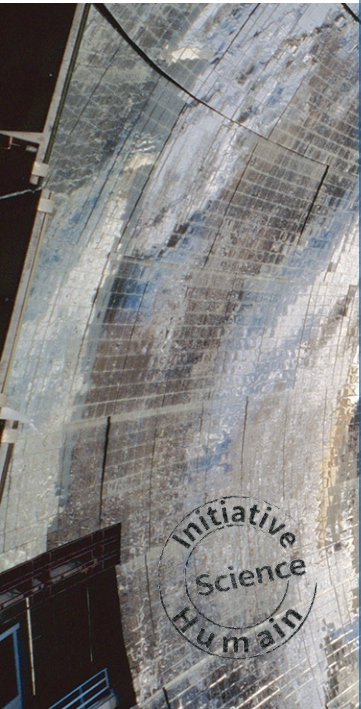


UNIVERSITÉ  
PERPIGNAN  
VIA  
DOMITIA



Régis OLIVES, Aubin TOUZO

[olives@univ-perp.fr](mailto:olives@univ-perp.fr)





## Plan

Introduction

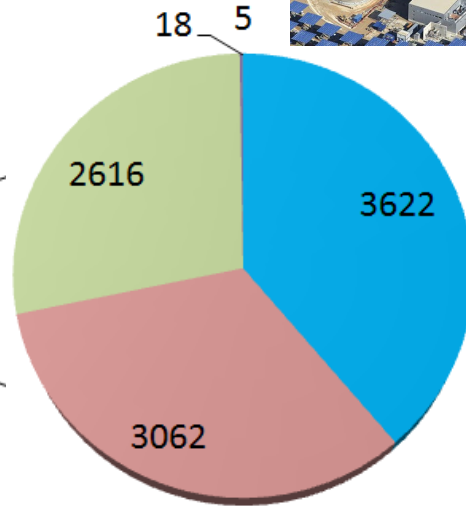
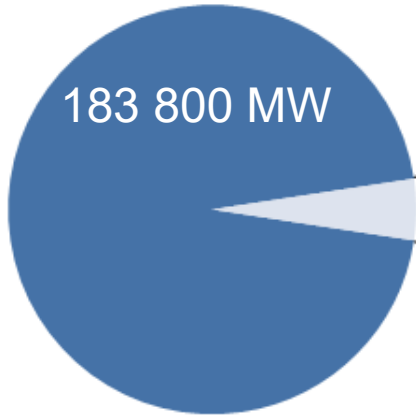
Stockage thermocline

Modélisation du stockage

Conclusion

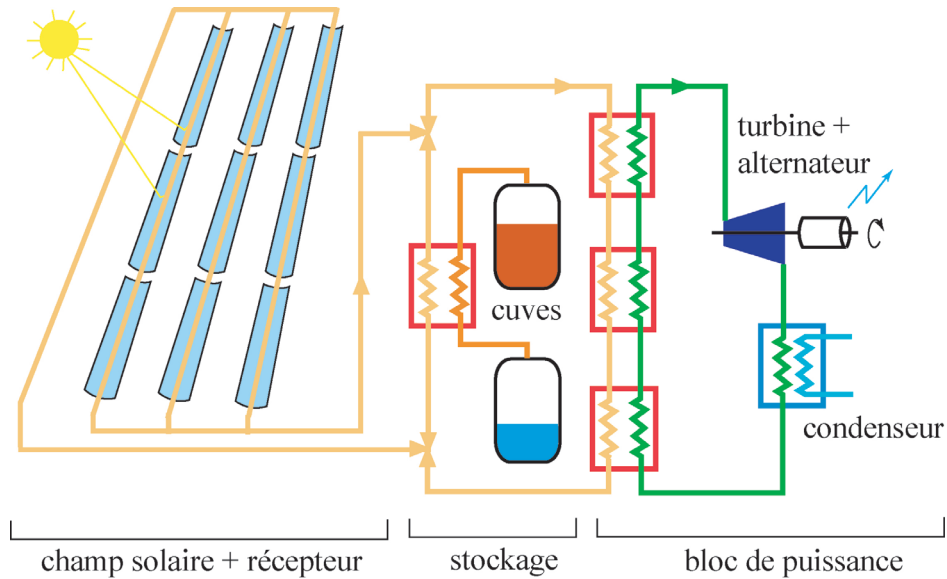
# Stockage d'énergie

■ pumped hydro storage

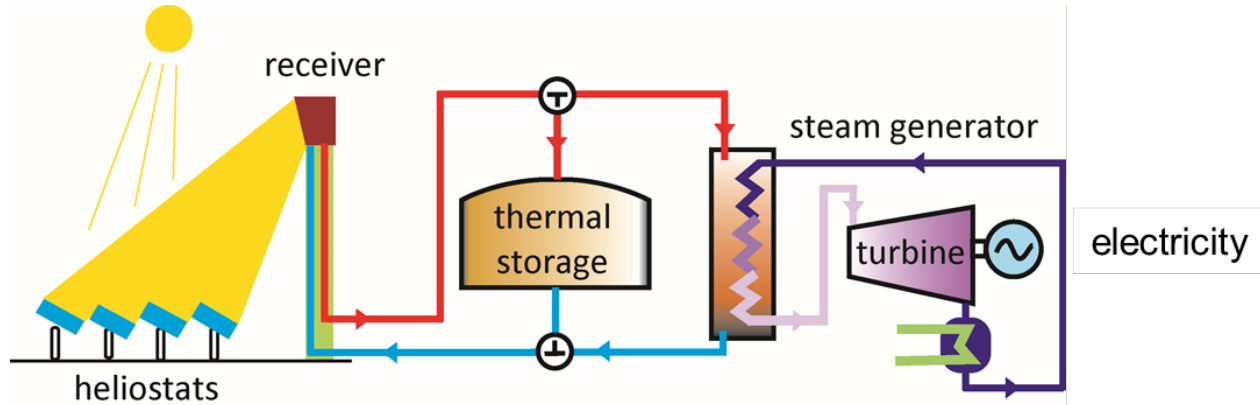


- thermal storage
- electro-chemical
- electro-mechanical
- hydrogen storage
- liquid air energy storage

# Stockage d'énergie pour centrales solaires



## Stockage d'énergie pour centrales solaires



→ Stockage thermocline

# Stockage d'énergie pour la récupération et la valorisation de chaleur fatale industrielle

En France



36%

de la consommation de combustibles de l'industrie est

perdue sous forme de chaleur soit 109,5 TWh\*



Connectée aux réseaux de chaleur urbains



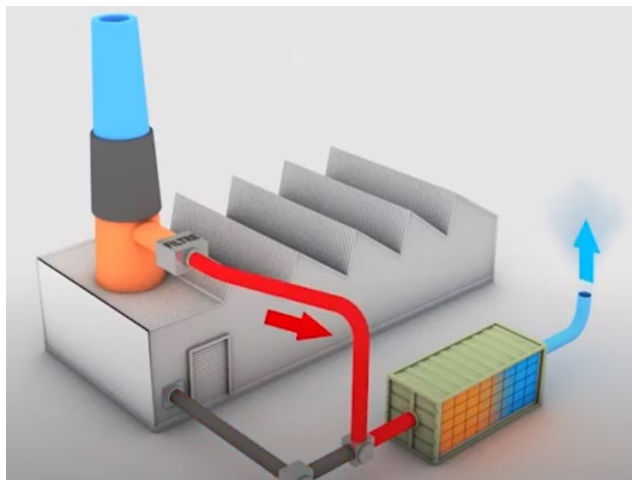
Cette chaleur peut être collectée et valorisée

Réutilisée dans l'industrie pour d'autres processus

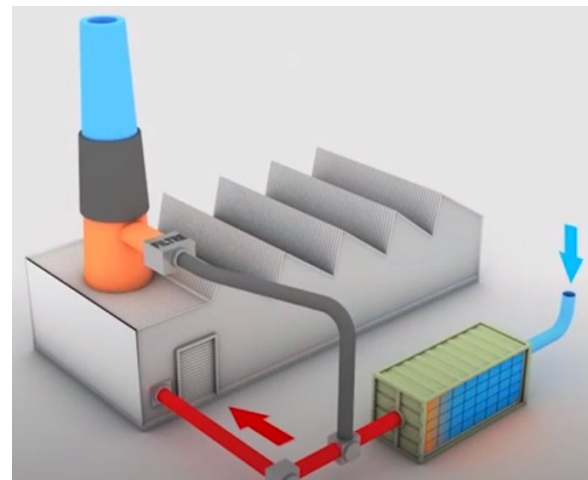
Production d'électricité ⚡



# Stockage d'énergie pour la récupération et la valorisation de chaleur fatale industrielle

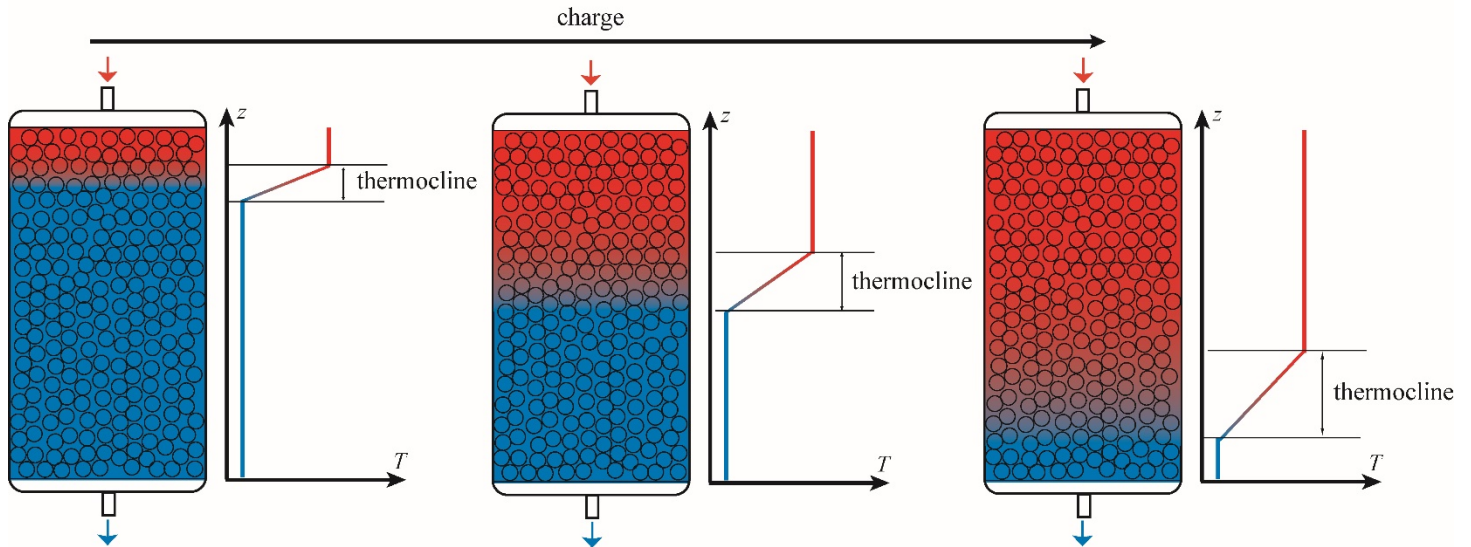


Charge



Décharge

# Stockage thermocline

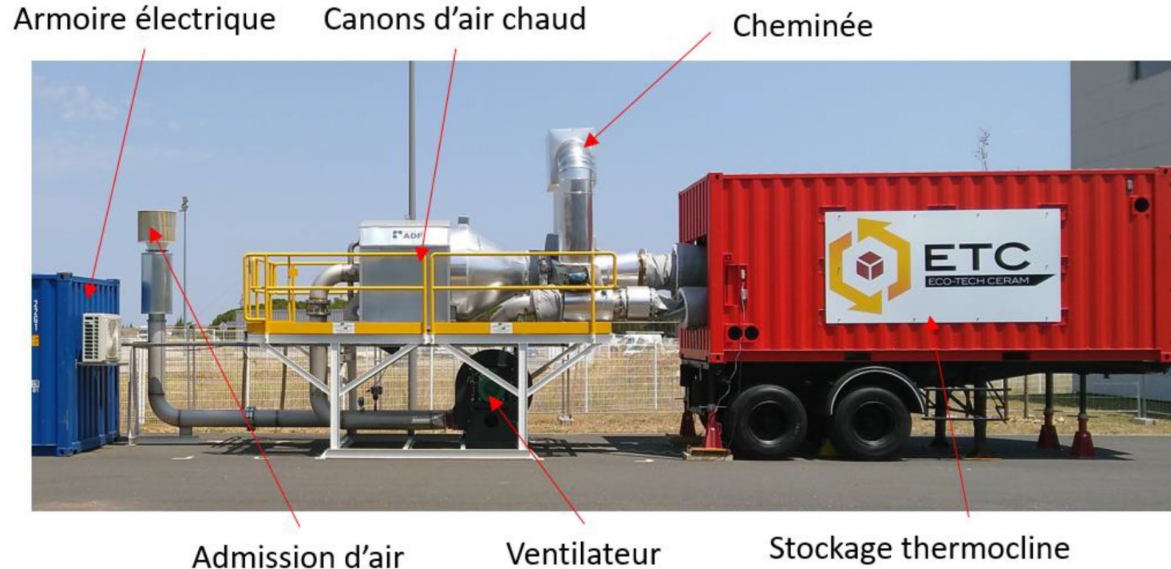


Modélisation

- ➔ dimensionnement
- ➔ optimisation
- ➔ contrôle – commande
- ➔ intégration dans un réseau



## Stockage thermocline



Capacité de stockage :  
1.9 MWh<sub>th</sub> (à 525°C)

Puissance de charge :  
300 kW<sub>th</sub>

Dimension de la cuve :  
3.08 x 1.70 x 1.70 m<sup>3</sup>

Matériaux :  
16 tonnes de bauxite  
particules de Ø 30 mm  
porosité : 40%

## Stockage thermocline : modélisation

Modèle à trois températures :

Fluide : 
$$\varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_{eff,f} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - u_f \varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + h_c A_{sf} (T_s - T_f) + h_{fw} A_{fw} (T_f - T_w)$$

Solide : 
$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff,s} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + h_c A_{sf} (T_f - T_s) + h_{sw} A_{sw} (T_s - T_w)$$

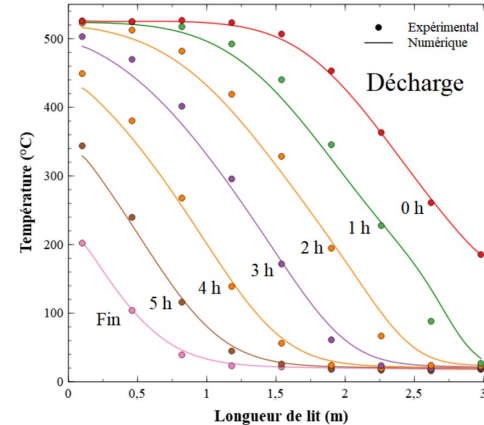
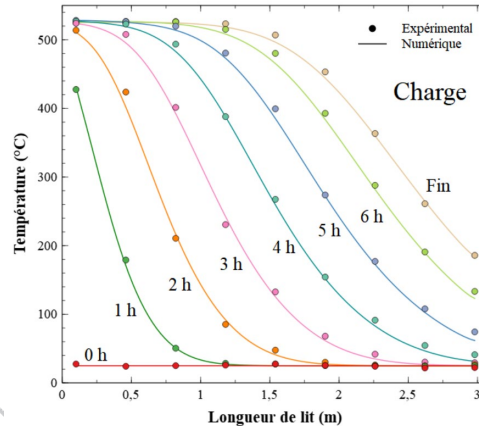
Paroi : 
$$\rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \lambda_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial x^2} + h_{fw} A_{fw} (T_f - T_w) + h_{sw} A_{sw} (T_s - T_w) + h_{ext} A_{ext} (T_{amb} - T_w)$$

# Stockage thermocline : modélisation

Modèle à deux températures :

Fluide : 
$$\varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial t} = \lambda_{eff,f} \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} - u_f \varepsilon \rho_f C_f \frac{\partial T_f}{\partial x} + h_c A_{sf} (T_s - T_f)$$

Solide : 
$$(1 - \varepsilon) \rho_s C_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_{eff,s} \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} + h_c A_{sf} (T_f - T_s)$$



## Stockage thermocline : modélisation

Modèle de Schumann :

$$\text{Fluide :} \quad \frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{NUT}{L}(T_s - T_f) - \frac{m_f}{\dot{m}_f L} \frac{\partial T_f}{\partial t}$$

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

Nombre d'unités de transfert et nombre de Stanton

$$NUT = St \frac{S_{exch}}{S_{flow}} \quad St = \frac{h \cdot S_{flow}}{\dot{m}_f \cdot C_f}$$

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

## Stockage thermocline : modélisation

Modèle de Schumann adimensionnalisé :

$$\begin{cases} \text{Fluide :} & \frac{\partial T_f^*}{\partial \chi} = T_s^* - T_f^* \\ \text{Solide :} & \frac{\partial T_s^*}{\partial \tau} = T_f^* - T_s^* \end{cases}$$

En posant :

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

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

## Stockage thermocline : résolution

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

$$\begin{aligned} \text{Fluide :} & \quad \left\{ \begin{array}{l} L_t L_x \left\{ \frac{\partial T_f^*}{\partial \chi} \right\} = L_t L_x \{ (T_s^* - T_f^*) \} \\ L_t L_x \left\{ \frac{\partial T_s^*}{\partial \tau} \right\} = L_t L_x \{ (T_f^* - T_s^*) \} \end{array} \right. \\ \text{Solide :} & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} p \overline{\overline{T_f^*}}(p, s) - \overline{\overline{T_f^*}}(0, s) = [\overline{\overline{T_s^*}}(p, s) - \overline{\overline{T_f^*}}(p, s)] \\ s \overline{\overline{T_s^*}}(p, s) - \overline{\overline{T_s^*}}(p, 0) = [\overline{\overline{T_f^*}}(p, s) - \overline{\overline{T_s^*}}(p, s)] \end{array} \right. & \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \overline{\overline{T_f^*}}(p, s) = \frac{1}{s(p + \frac{s}{s+1})} \\ \overline{\overline{T_s^*}}(p, s) = \frac{1}{s(s+1)(p + \frac{s}{s+1})} \end{array} \right. \\ \overline{\overline{T_s^*}}(p, 0) = 0 \quad \text{et} \quad \overline{\overline{T_f^*}}(0, s) = \frac{1}{s} \end{aligned}$$

## Stockage thermocline : résolution

Transformée de Laplace inverse sur l'espace et le temps :

$$\begin{cases} \text{Fluide :} & T_f^*(\chi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \int_0^\chi e^{-\xi} I_0(2\sqrt{\xi \cdot \tau}) d\xi \\ \text{Solide :} & T_s^*(\chi, \tau) = e^{-\chi} \int_0^\tau e^{-\eta} I_0(2\sqrt{\chi \cdot \eta}) d\eta \end{cases}$$

Remarque :  $T_f^*(\chi, \tau) - T_s^*(\chi, \tau) = e^{-\chi} e^{-\tau} I_0(2\sqrt{\chi \cdot \tau})$

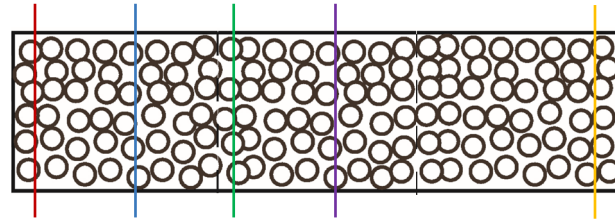
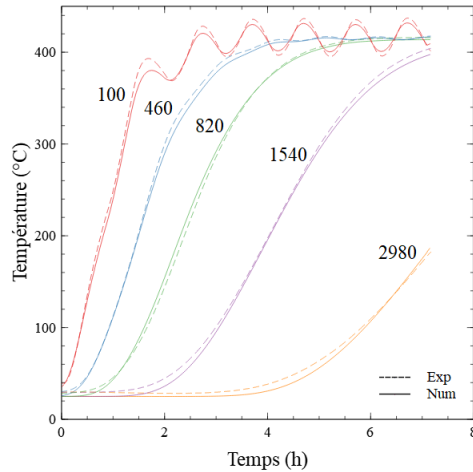
$$T_f^*(\chi, \tau) - T_s^*(\chi, \tau) = e^{-\chi} e^{-\tau} \left[ 1 + (\chi \cdot \tau) + \frac{(\chi \cdot \tau)^2}{4} + \frac{(\chi \cdot \tau)^3}{36} + \dots \right]$$

symétrie

$I_0$  : fonction de Bessel modifiée

# Stockage thermocline : modélisation

Profil de température selon la position :



→ amortissement des variations du signal d'entrée

→ effet de filtrage du milieu poreux

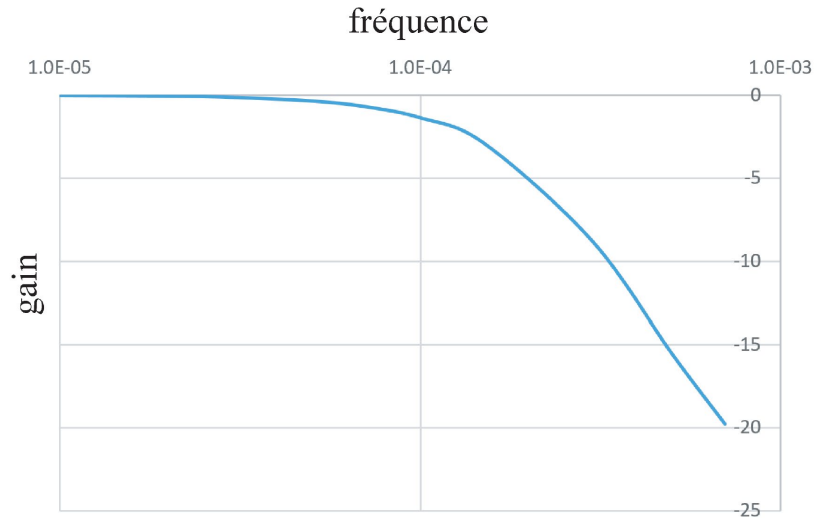


# Stockage thermocline : modélisation à l'aide des fonctions de transfert

Le stockage en tant que filtre :

- d'ordre 1  $\overline{T}_f^*(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1+s}$   $T^*(\tau) = 1 - e^{-\tau}$

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



## Stockage thermocline : modélisation à l'aide des fonctions de transfert

Le stockage en tant que filtre :

- d'ordre 1  $\overline{T}_f^*(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1+s}$   $T_f^*(\tau) = 1 - e^{-\tau}$

- d'ordre 2  $\overline{T}_f^*(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(1+s)^2}$   $T_f^*(\tau) = 1 - (1+\tau)e^{-\tau}$

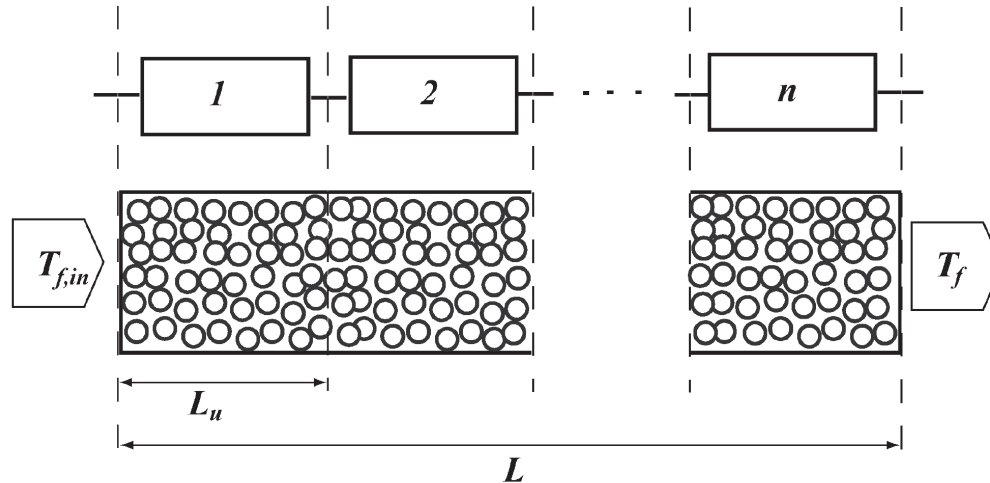
- ...

- d'ordre  $n$   $\overline{T}_f^*(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(1+s)^n}$   $T_f^*(\tau) = 1 - e_{n-1}(\tau) \cdot e^{-\tau}$

avec  $e_n(\tau) = 1 + \frac{\tau}{1!} + \frac{\tau^2}{2!} + \frac{\tau^3}{3!} + \dots + \frac{\tau^n}{n!}$

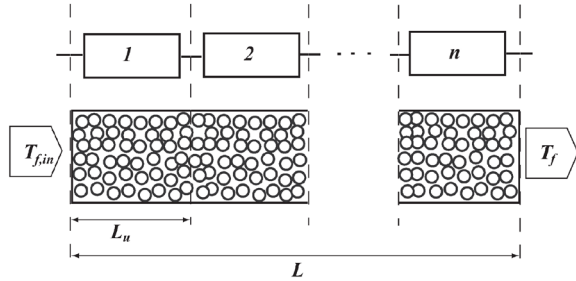
# Stockage thermocline : modélisation à l'aide des fonctions de transfert

Le stockage = un ensemble de filtres en série :



# Stockage thermocline : modélisation à l'aide des fonctions de transfert

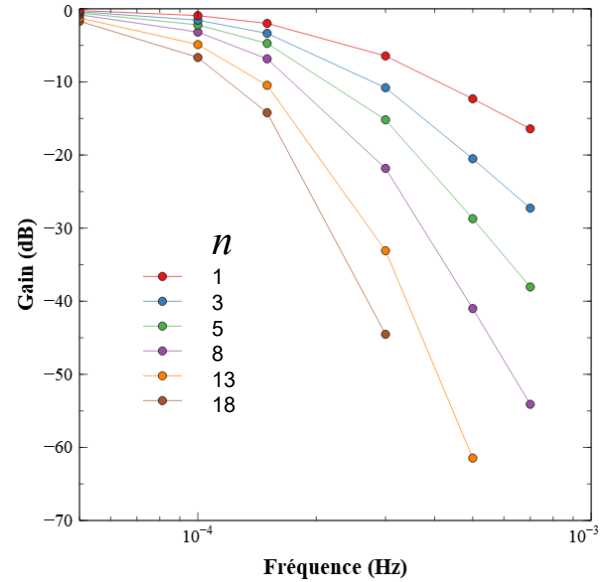
Le stockage =  $n$  filtres en série :



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

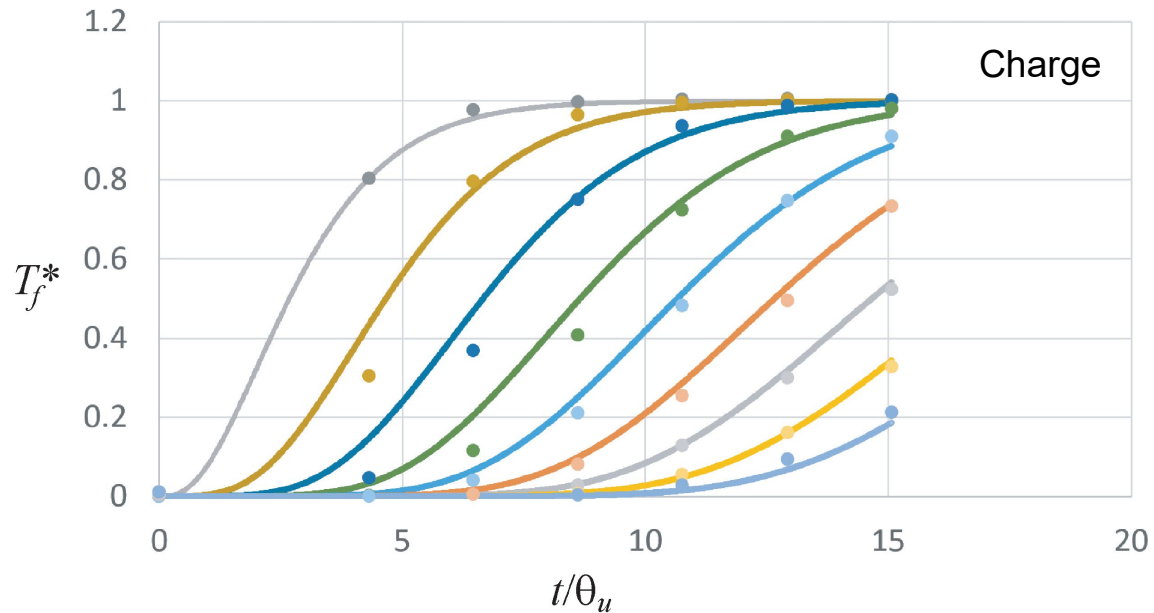
NUT unité 
$$NUT_u = \frac{6.h.(1-\epsilon)L_u.S}{\dot{m}_f C_f D}$$

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



# Stockage thermocline : modélisation à l'aide des fonctions de transfert

Comparaison du modèle de filtres en série et des résultats expérimentaux



→ Abaques de dimensionnement

# Conclusion

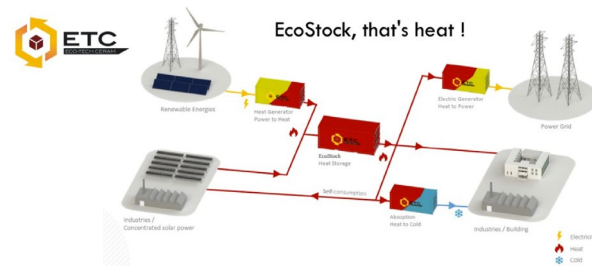
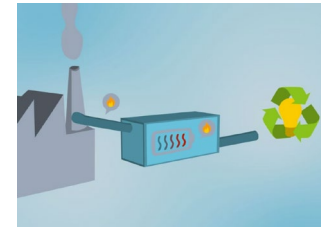
Méthode de résolution basée sur la double transformée de Laplace

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



**Merci !**



[www.promes.cnrs.fr](http://www.promes.cnrs.fr)

[www.cnrs.fr](http://www.cnrs.fr)



UNIVERSITÉ  
PERPIGNAN  
VIA  
DOMITIA

