



Échangeurs-stockeurs de type thermocline destinés à la récupération et la valorisation de chaleur fatale



Régis OLIVÈS

olives@univ-perp.fr





Plan

Introduction

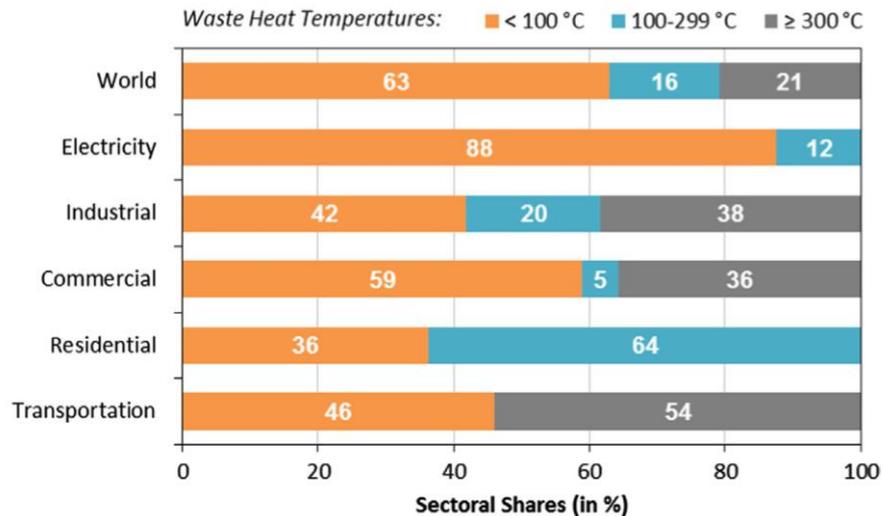
Échangeur-stockeur de type thermocline

Modélisation du stockage

Optimisation multi-objectifs

Conclusion

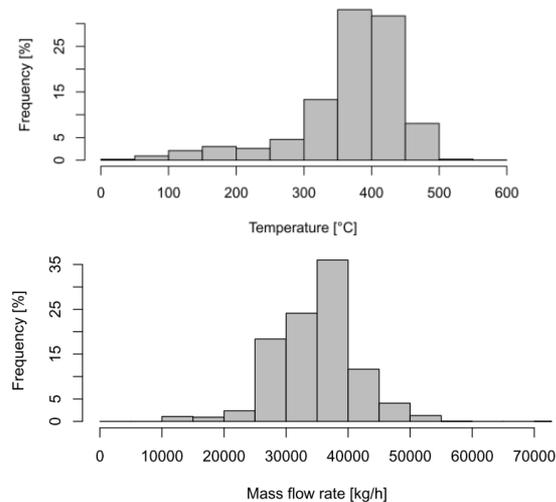
Introduction : les enjeux



➤ 25 000 - 35 000 TWh de chaleur fatale (>100°C)

C. Forman et al.. 2016

Difficulté : la variabilité du gisement



L. Battisti et al.. 2015

Besoin d'une solution de stockage haute température
→ Lisser le gisement
→ Adéquation production / consommation

Quel usage ?

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

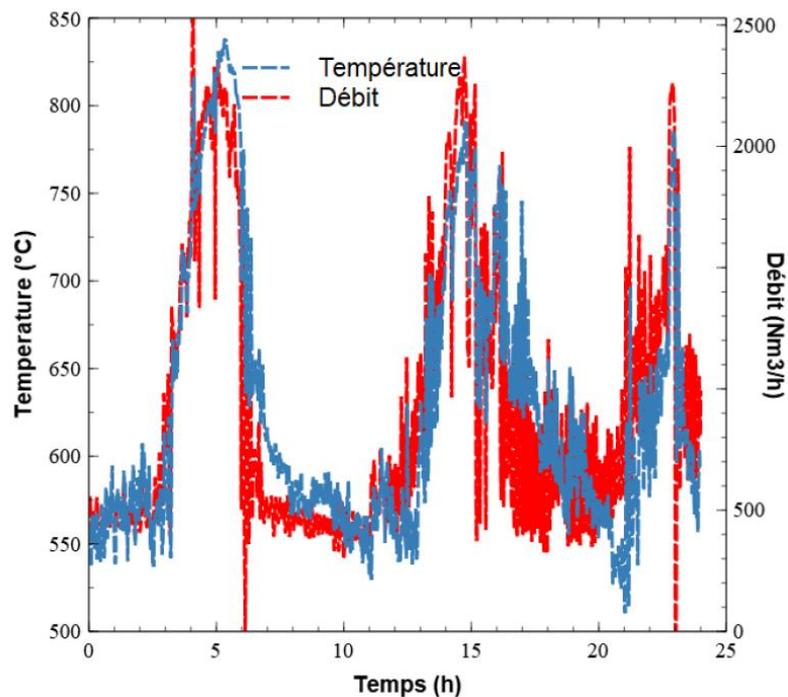
Réutilisée dans l'industrie
pour d'autres processus

Production d'électricité ⚡

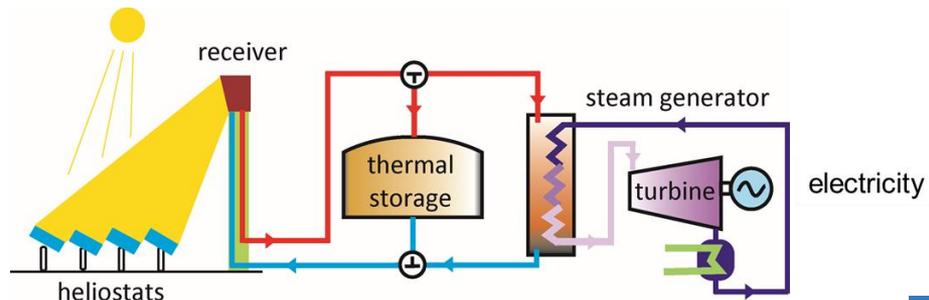
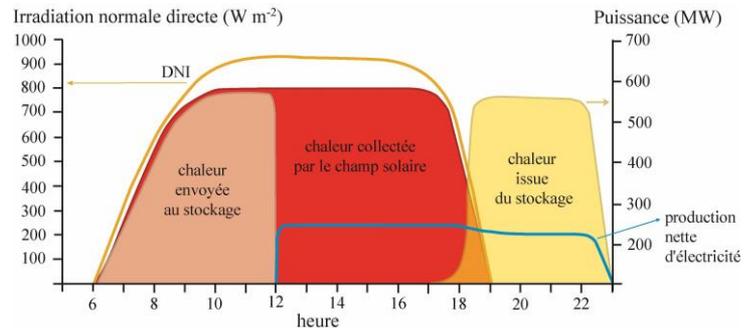
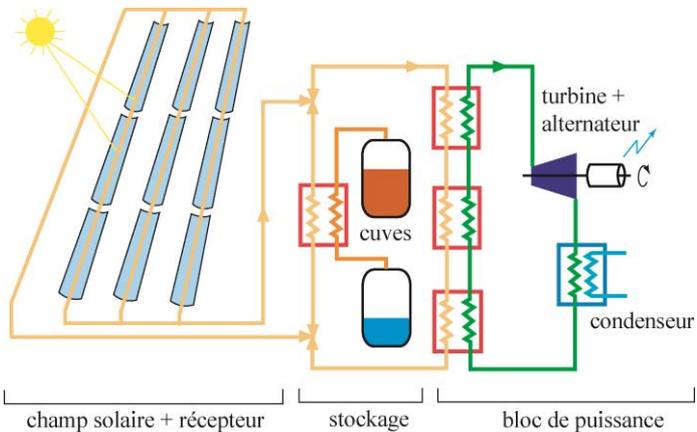


Stockage d'énergie pour la récupération et la valorisation de chaleur fatale industrielle

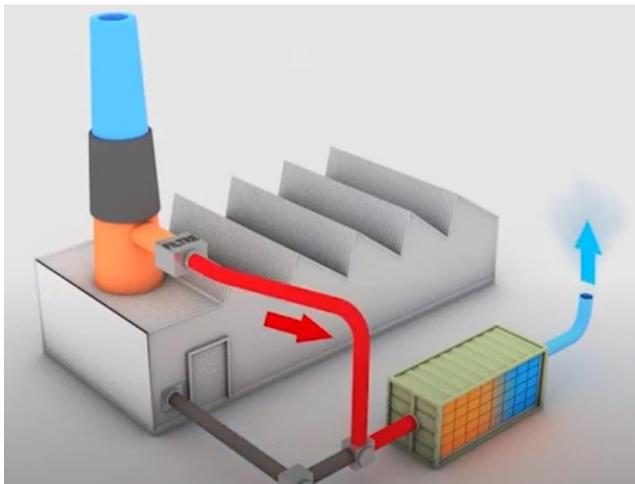
Exemple d'un gisement de chaleur d'une aciérie



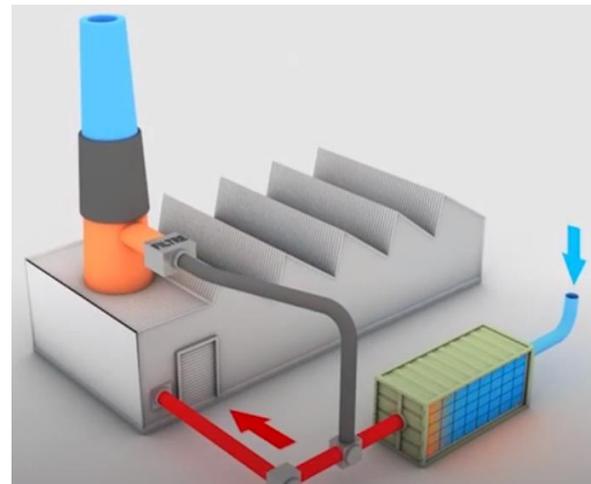
Stockage d'énergie pour centrales solaires



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

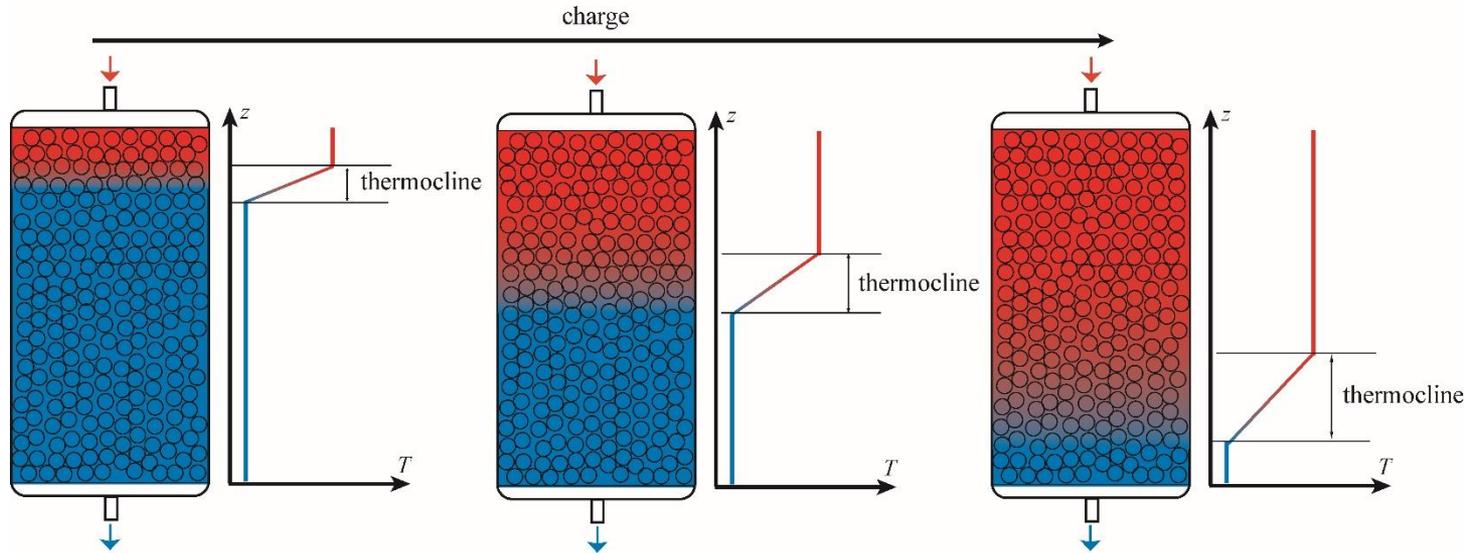


Charge



Décharge

Échangeur-stockeur de type thermocline

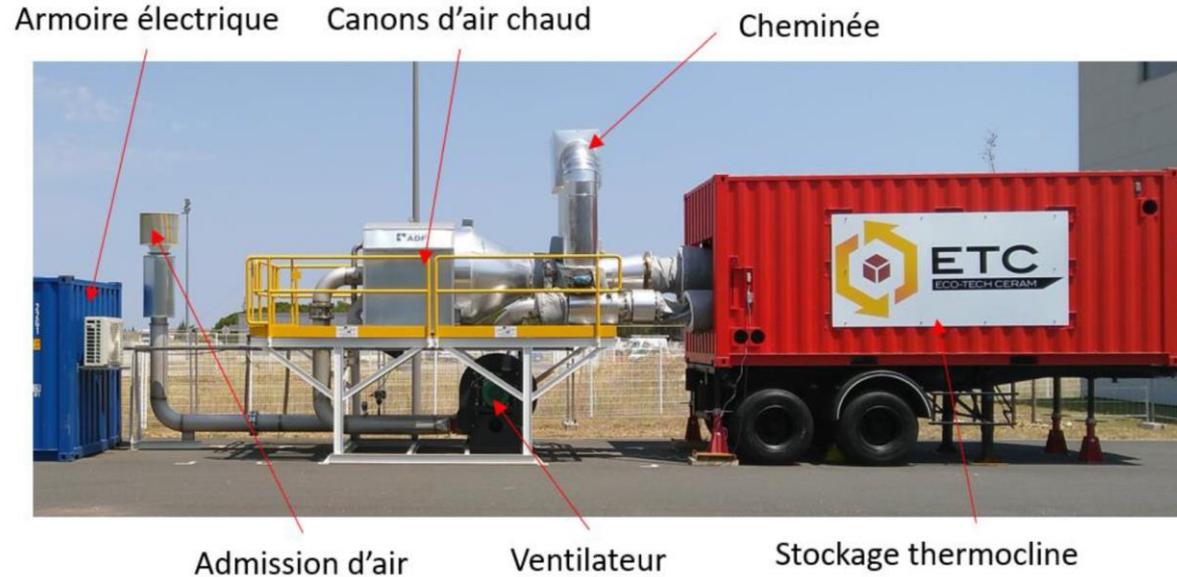


Modélisation

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

Stockage thermocline

Unité de stockage industrielle : 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

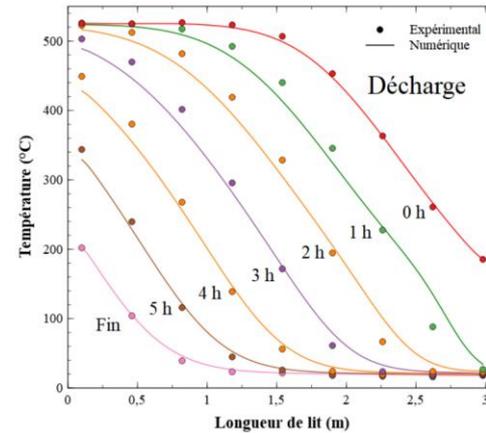
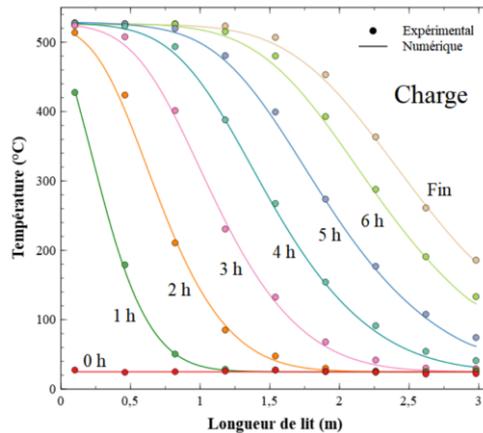
Matériaux :
16 tonnes de bauxite
particules de Ø 30 mm
porosité : 40%

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 : intégration au réseau

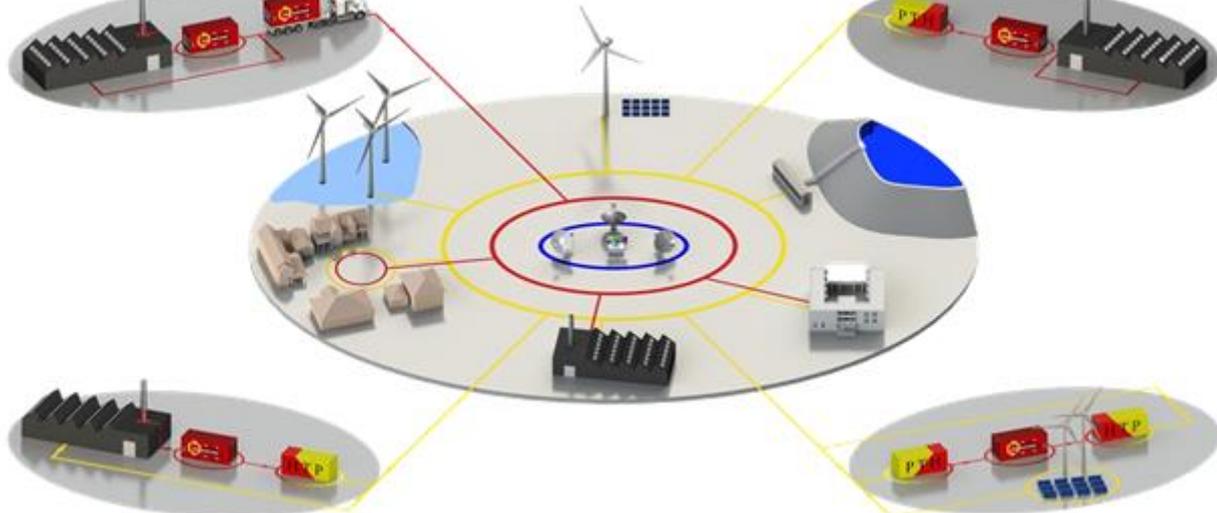
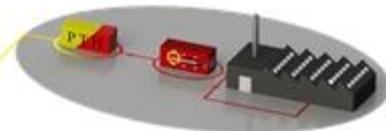
Heat to Heat

Valorisation thermique de chaleur industrielle



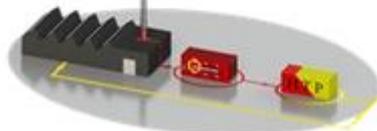
Power to Heat

Convertir l'électricité en chaleur décarbonée haute température



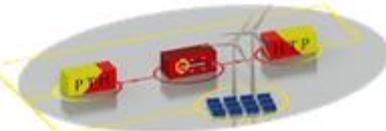
Heat to Power

Valorisation électrique de chaleur industrielle



Power to Power

Un stockage multi-énergie



Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Modèle de Schumann :

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

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

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

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Modèle de Schumann :

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

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

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

Adimensionnalisation en température, en espace et en temps

$$\theta = \frac{T - T_{s0}}{T_{f,in} - T_{s0}} \quad \chi = St. \frac{S_{ech}}{S_{eclt}} \frac{x}{L} \quad \tau = St. \frac{S_{ech}}{S_{eclt}} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} t$$

Nombre de Stanton, surface d'échange et section d'écoulement :

$$St = \frac{h \cdot S_{eclt}}{\dot{m}_f \cdot C_f} = NUT \frac{S_{eclt}}{S_{ech}} \quad St = \frac{2}{Re_D \cdot Pr} + \frac{1.1}{Re_D^{0.4} Pr^{2/3}} \quad \frac{S_{ech}}{S_{eclt}} = \frac{6 \cdot L \cdot (1 - \epsilon)}{D \cdot \epsilon}$$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Modèle de Schumann adimensionnel :

$$\begin{cases} \text{Fluide : } \frac{\partial \theta_f}{\partial \chi} = \theta_s - \theta_f \\ \text{Solide : } \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \theta_f - \theta_s \end{cases}$$

avec $\theta_s(\chi, 0) = \theta_f(\chi, 0) = 0$ et $\theta_{f,in} = 1$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée – solution analytique

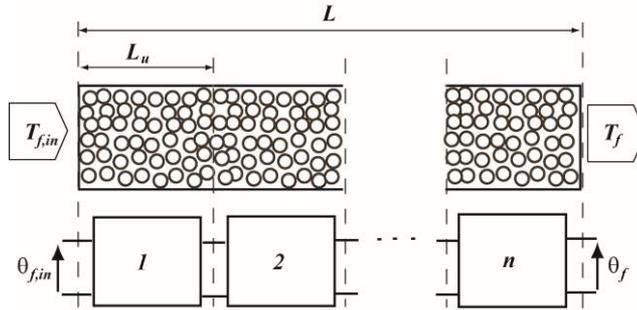
En appliquant la double transformée de Laplace en espace et en temps

$$\begin{array}{l} \text{Fluide :} \\ \text{Solide :} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} L_t L_x \left\{ \frac{\partial \theta_f}{\partial \chi} \right\} = L_t L_x \{(\theta_s - \theta_f)\} \\ L_t L_x \left\{ \frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} \right\} = L_t L_x \{(\theta_f - \theta_s)\} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \overline{\overline{\theta_f}}(p, s) = \frac{1}{s(p + \frac{s}{s+1})} \\ \overline{\overline{\theta_s}}(p, s) = \frac{1}{s(s+1)(p + \frac{s}{s+1})} \end{array} \right.$$

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \theta_f(\chi, \tau) = 1 - e^{-\tau} \int_0^\chi e^{-\xi} I_0(2\sqrt{\xi\tau}) d\xi \\ \theta_s(\chi, \tau) = e^{-\chi} \int_0^\tau e^{-\eta} I_0(2\sqrt{\chi\eta}) d\eta \end{array} \right.$$

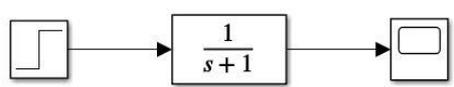
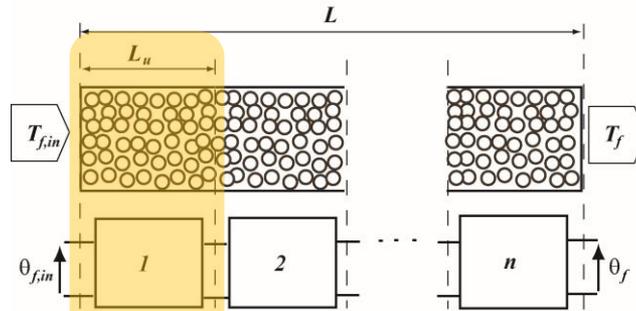
Stockage thermocline : modélisation encore plus simplifiée !

Modèle simplifié : ensemble de n filtres en série



Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Ensemble de n filtres en série



$$\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1+s}$$



$$\theta_f(\tau^*) = 1 - e^{-\tau^*}$$

avec $\tau^* = \alpha \cdot St \cdot \frac{6 \cdot L_u \cdot (1 - \epsilon)}{D \cdot \epsilon} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f t}{m_s C_s}$

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Le stockage en tant que filtre :

- d'ordre 1 $\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{1+s}$ $\theta_f(\tau^*) = 1 - e^{-\tau^*}$

- d'ordre 2 $\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(1+s)^2}$ $\theta_f(\tau^*) = 1 - (1 + \tau^*)e^{-\tau^*}$

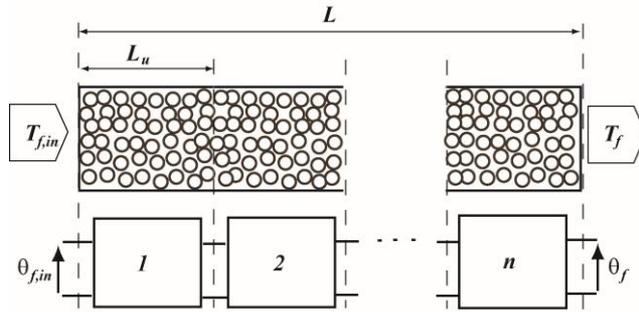
- ...

- d'ordre n $\overline{\theta}_f(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{1}{(1+s)^n}$ $\theta_f(\tau^*) = 1 - e_{n-1}(\tau^*) \cdot e^{-\tau^*}$

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

Stockage thermocline : modélisation simplifiée

Ensemble de n filtres en série



$$\theta_f(\tau^*) = 1 - e_{n-1}(\tau^*) \cdot e^{-\tau^*}$$

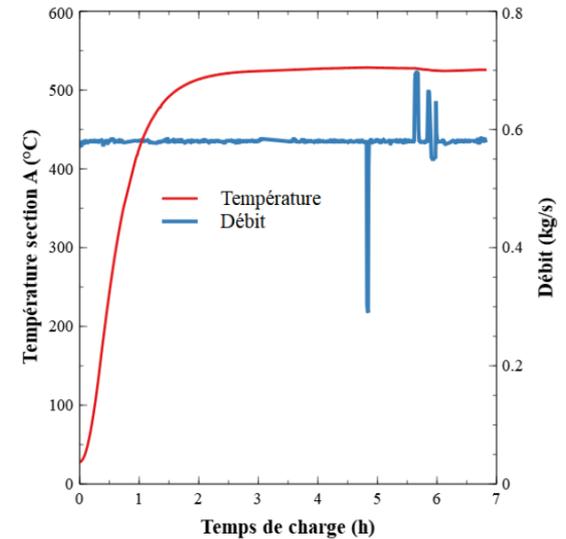
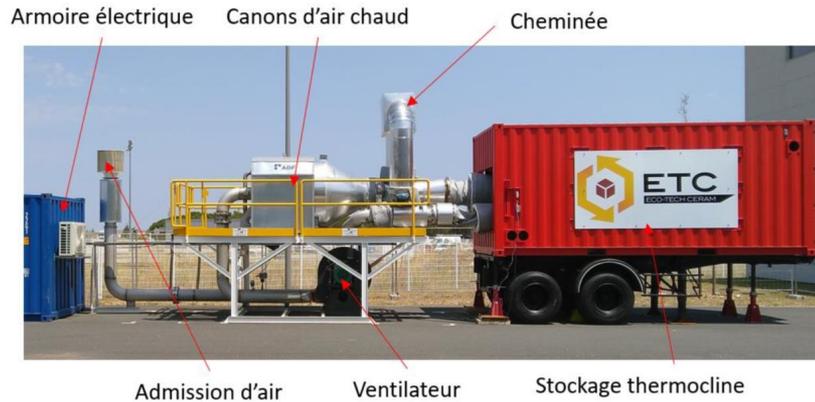
avec $\tau^* = \alpha \cdot St \cdot \frac{6 \cdot L_u \cdot (1 - \epsilon) \cdot \dot{m}_f C_f}{D \cdot \epsilon} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f}{m_s C_s} t$

paramètres à identifier

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

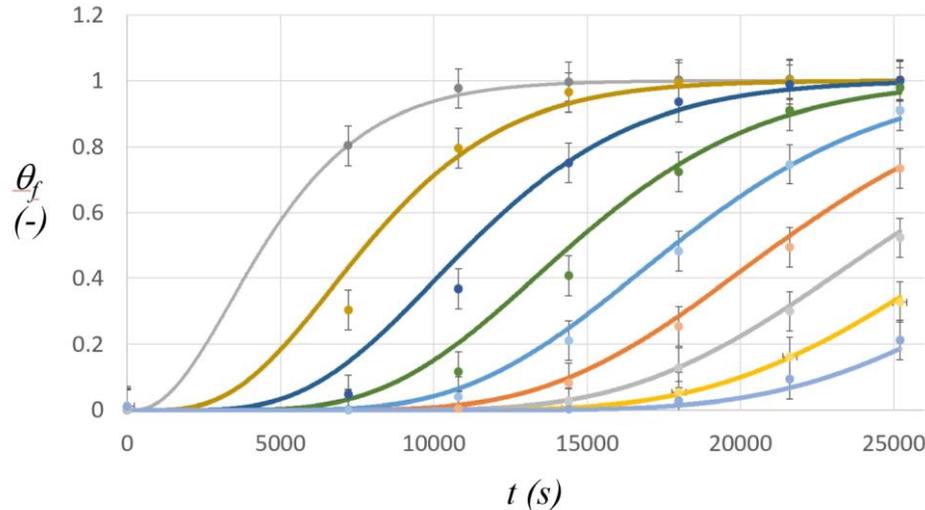
Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à un échelon de température

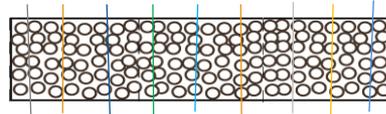


Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à un échelon de température



Position (mm) : 100 460 ... 2980



Identification de la longueur caractéristique :

$$L_u \simeq 6D$$

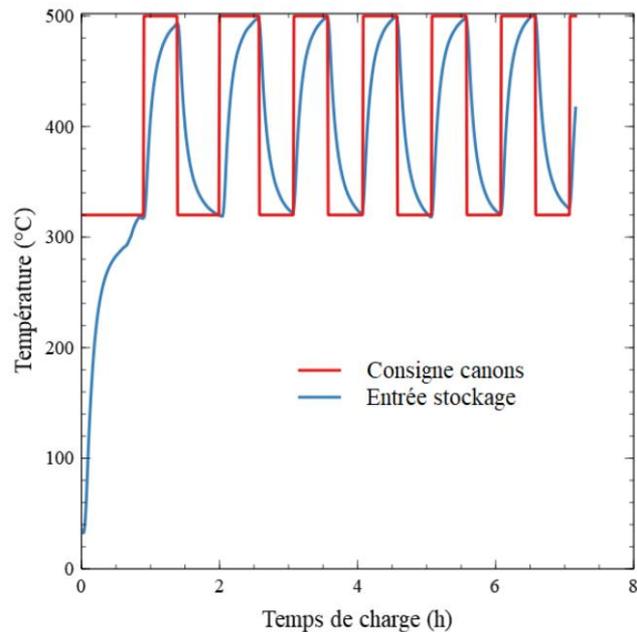
et du temps :

$$\tau^* = 6,82\tau$$

$$\tau = St. \frac{S_{ech}}{S_{ect}} \cdot \frac{\dot{m}_f C_f t}{m_s C_s}$$

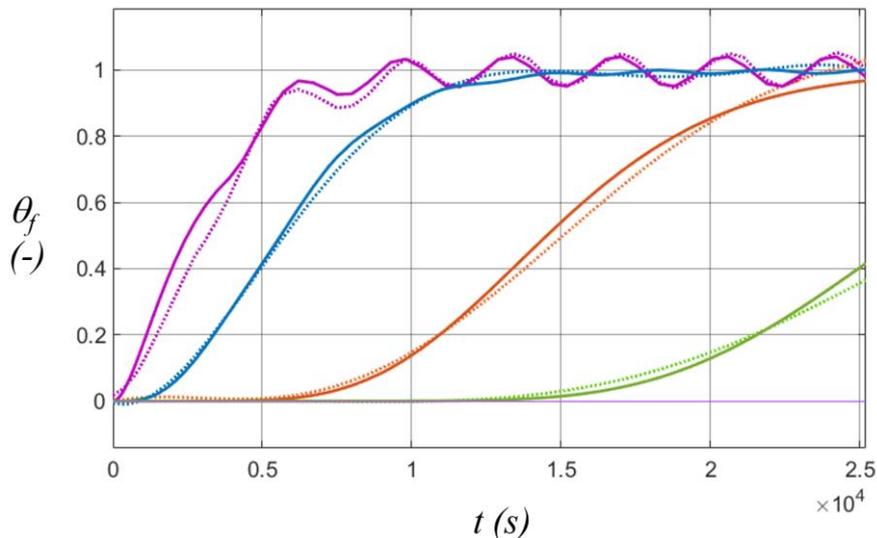
Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à des variations de type créneau

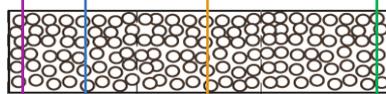


Stockage thermocline : comparaison modélisation/expérimentation

Cas du stockage soumis à des variations de type créneau



Position (mm) : 100 460 1540 2980



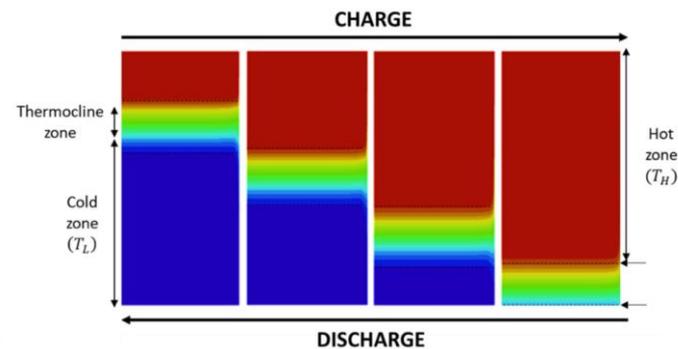
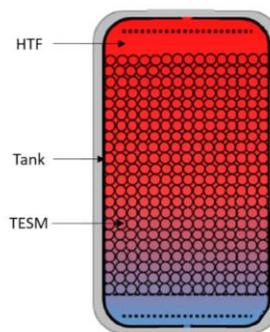
- Amortissement des oscillations : effet de filtrage du milieu poreux
- Robustesse du stockage vis-à-vis des fluctuations du gisement
- Temps de calcul réduit : simulation sur de longues périodes (année)

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Maximiser le rendement exergetique

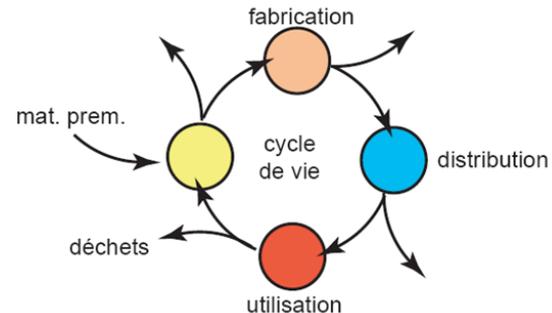
$$\eta_{ex} = \frac{-\int_0^{t_{ds}} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt}{\int_0^{t_c} \dot{m} \cdot \Delta ex \cdot dt}$$

$$\Delta ex = c_f \cdot \left[T_{out} - T_{in} - T_{\infty} \cdot \ln\left(\frac{T_{out}}{T_{in}}\right) \right] + \frac{1}{\rho_f} \cdot (P_{out} - P_{in})$$



Optimisation d'un échangeur-stockeur

Minimiser l'empreinte environnementale
(analyse du cycle de vie)



International Reference Life Cycle Data system (ILCD) (European capita annual impact)

$$LCA = \Sigma$$

- Cumulative Energy Demand (CED) in MJ_{eq}
- Global Warming Potential (GWP) in $kgCO_{2eq}$
- Abiotic Depletion Potential of mineral, fossil and renewable resources (ADP) in $kg Sb_{eq}$
- Particulate matter (PM) in $kg PM2.5_{eq}$

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Minimiser le coût de l'énergie stockée

Levelized cost of energy

$$LCOE = \frac{LCC}{US_f(N, i^*) \cdot H}$$

Life Cycle Costs

$$LCC = C_I + C_M + C_O + C_R - C_{Res} + C_D$$

investment, maintenance, operation, replacement, dismantling costs

residual value

Annual heat production : H

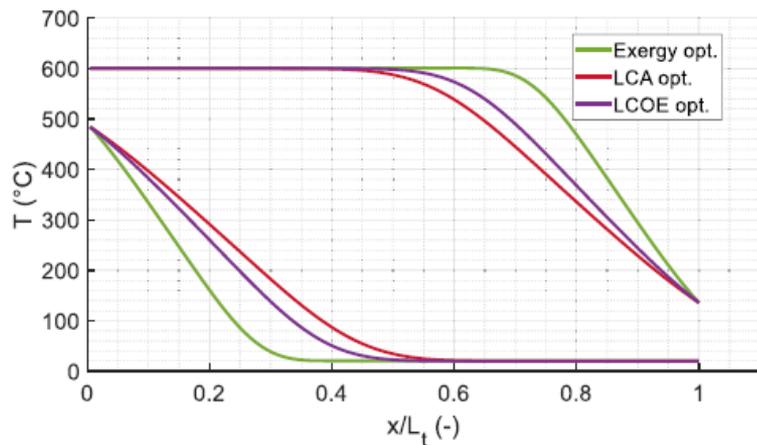
Uniform Series factor

$$US_f(N, i^*) = \frac{(1 + i^*)^N - 1}{i^* \cdot (1 + i^*)^N}$$

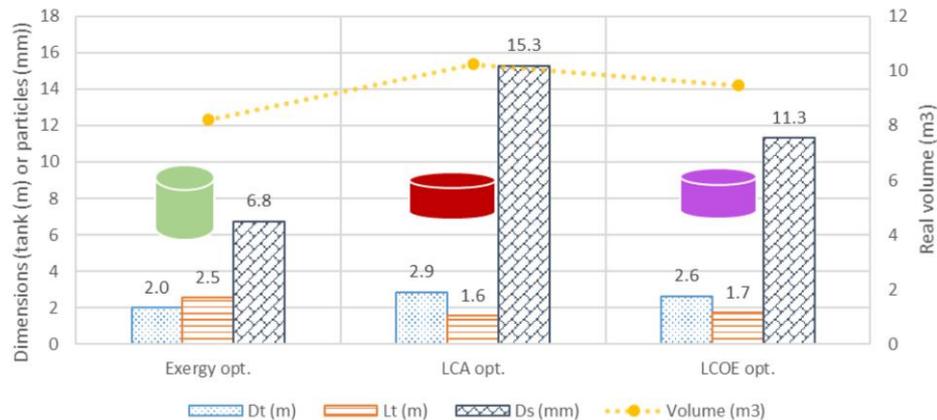
real interest rate

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Profils de température

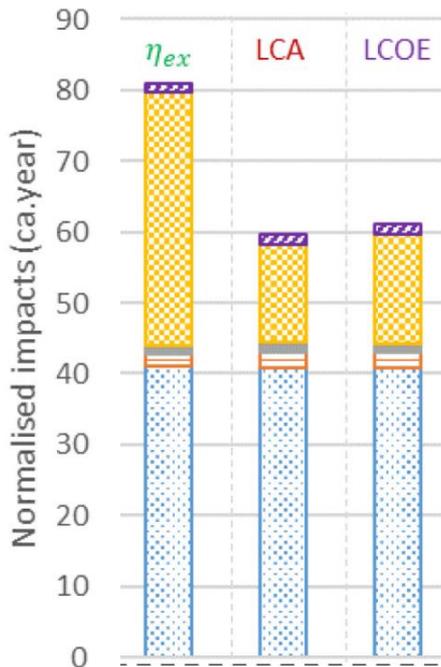


Design optimal



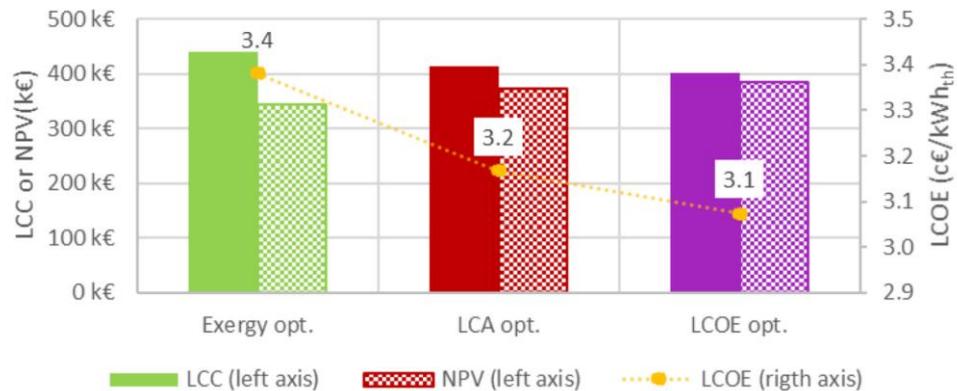
Optimisation d'un échangeur-stockeur

LCA normalised indicators



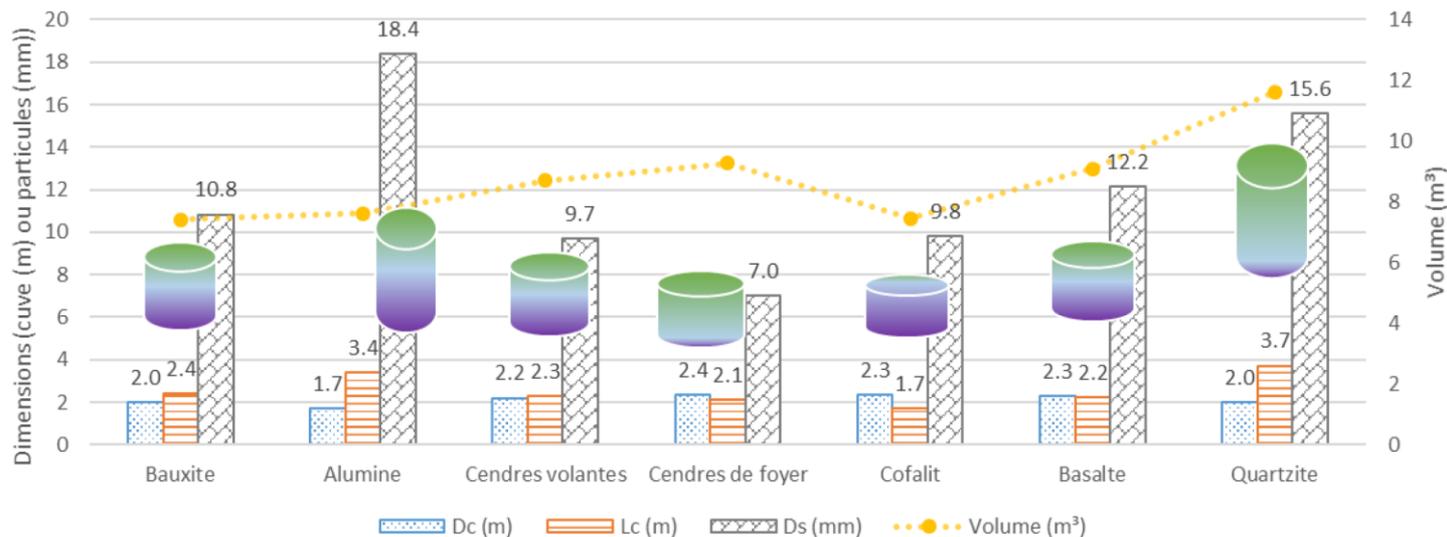
■ Tank
 ■ TESM
 ■ Transport
 ■ Use
 ■ End of life

economic indicators



Optimisation d'un échangeur-stockeur

- ➔ Optimisation multi-objectifs :
- rendement exergetique
- empreinte environnementale (ACV)
- LCOE (Levelized cost of energy)



Dimensions des solutions sélectionnées avec sept solides de garnissage différents

Optimisation d'un échangeur-stockeur

Optimisation multi-objectifs (méthode TOPSIS/Shannon)

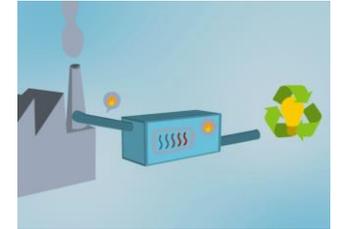
	Critères			Ratio	Classement
	N_{ex} (%)	ACV (hab.an)	LCOE (c€/kWh _{th})	$\frac{SN}{SN + SI}$	
Cendres de foyer	2,05	57,7	3,35	0,9553	1
Cendres volantes	2,58	55,8	3,23	0,7968	2
Basalte	2,88	51,3	3,17	0,6905	3
Cofalit	2,90	51,8	2,92	0,6803	4
Quartzite	3,12	61,1	3,66	0,5882	5
Bauxite	3,11	68,5	3,27	0,5838	6
Alumine	4,66	77,8	3,56	0,0030	7

$$N_{ex} = 1 - \eta_{ex}$$

- Performances exergetiques et énergetiques peu influencees par le materiau de garnissage
- Limitation des impacts environnementaux avec des materiaux issus des dechets ou de roches naturelles
- LCOE le plus faible avec les materiaux issus de dechets comme le cofalit

Conclusion

- Modélisation fine ou simplifiée
- Aide au dimensionnement
- Pilotage en régime dynamique
- Optimisation multi-objectifs (choix du matériau, taille...)
- Intégration de l'échangeur-stockeur à un réseau multi-énergie ou à une centrale solaire



Merci !



www.promes.cnrs.fr

www.cnrs.fr



Régis OLIVÈS

olives@univ-perp.fr