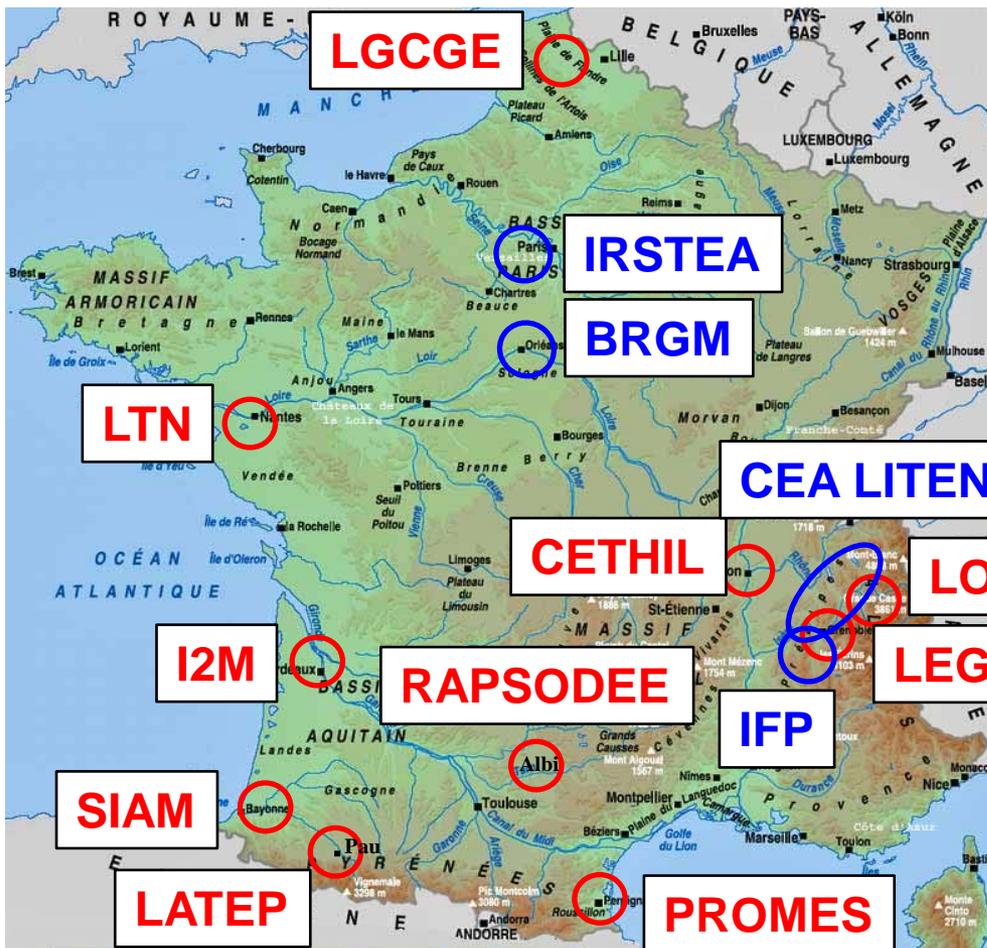


Atelier 2a : stockage sous toute ses formes
STOCKAGE solaire THERMIQUE
Revue

Benoit Stutz – laboratoire LOCIE



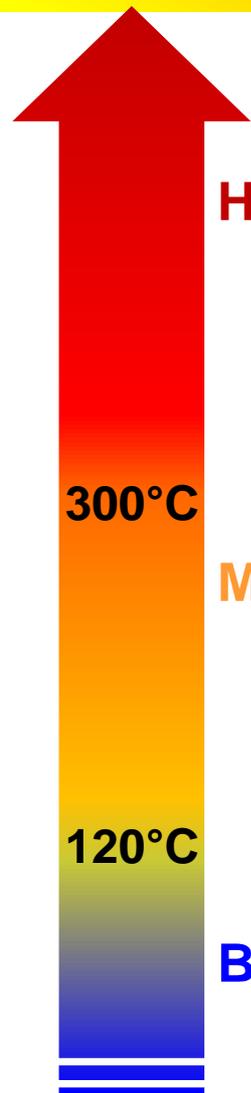
Groupe Stockage de FedEsol Unités mixtes & équipes d'accueil

+
EPIC
+
Industriels
=

Réseau Thématique Industriel sur le *Stockage de l'Energie* *Thermique* RESET

- Favoriser les programmes communs industrie-laboratoires
- Structurer la communauté dans les appels d'offres nationaux et européens
- Favoriser des plateformes expérimentales
- Echanger sur les outils et méthodes numériques liées au stockage
- Diffuser et médiatiser la connaissance et les actions sur le stockage

Introduction



Haute température



GEMASOLAR Granada/

Solaire thermodynamique

300°C

Moyenne température



Rejets industriels
production de vapeur



<http://www.aitgroup.fr/>

120°C

Basse température

ECS



Chauffage et rafraîchissement
des bâtiments



Agro-alimentaire

Introduction

Thermochimique



- Adsorption chimique/physique
- Absorption

Stockage latent

$$Q = M (c_p \Delta T + h_{sl})$$

Stockage sensible

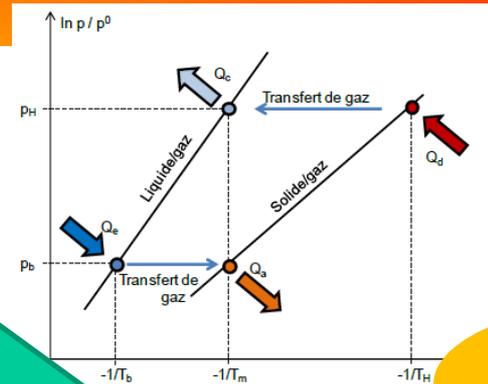
$$Q = Mc_p \Delta T$$

- Liquide
- Solide

Maturité



Cout complexité

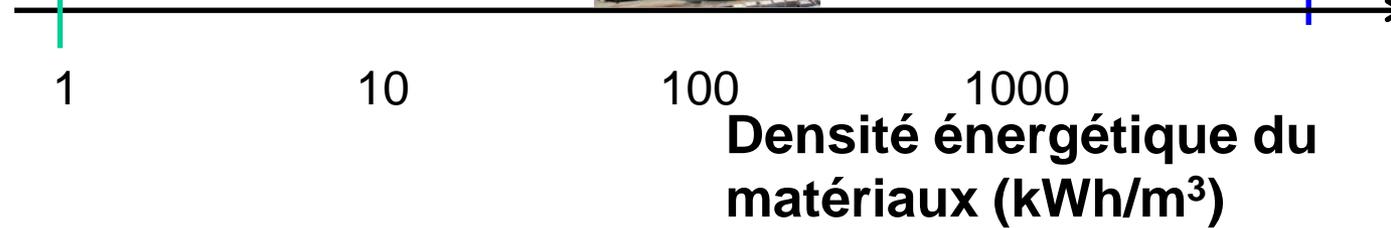


Adsorption chimique

Sorption physique

Latent

Sensible



Aperçu des enjeux sur le stockage thermique au travers de stockages

- Stockage thermique massif pour les centrales thermodynamiques

Stockage sensible

$$E_{car} = 1 \text{ GWh} ; P_{car} = 100 \text{ MW} ;$$

$$T_{car} = 500 \text{ }^\circ\text{C} ; t_{car} = 1 \text{ j}$$



- Stockage industriel procédé batch

Stockage latent

$$E_{car} = 100 \text{ kWh} ; P_{car} = 1 \text{ MW} ;$$

$$T_{car} = 100 \text{ }^\circ\text{C} ; t_{car} = 1 \text{ h}$$



- Stockage intersaisonnier de l'énergie solaire

Stockage thermochimique

$$E_{car} = 1 \text{ MWh} ; P_{car} = 1 \text{ kW} ;$$

$$T_{car} = 100 \text{ }^\circ\text{C} ; t_{car} = 1 \text{ an}$$



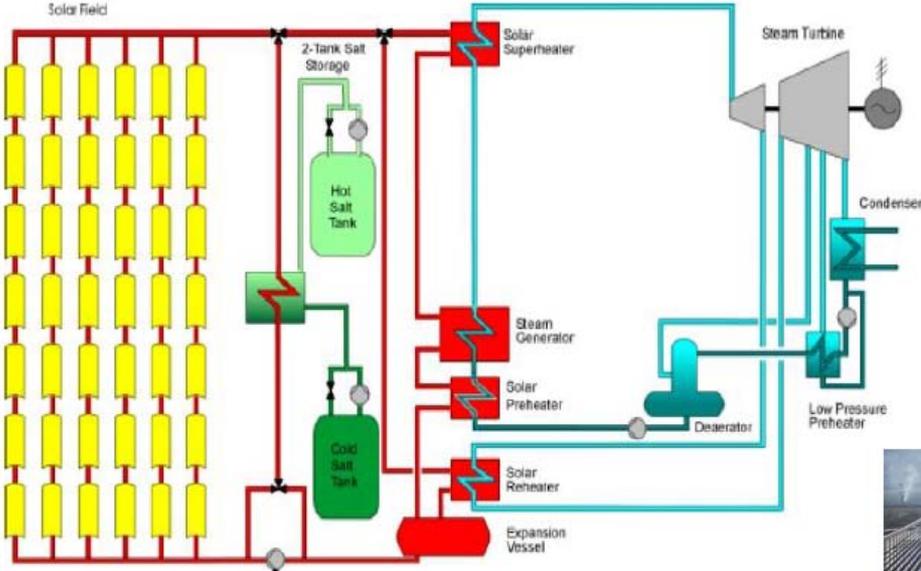
Stockage thermique massif pour les centrales thermodynamiques



$$E_{car} = 1 \text{ GWh} ;$$
$$P_{car} = 100 \text{ MW} ;$$
$$T_{car} = 500 \text{ }^{\circ}\text{C} ;$$
$$t_{car} = 1 \text{ j}$$

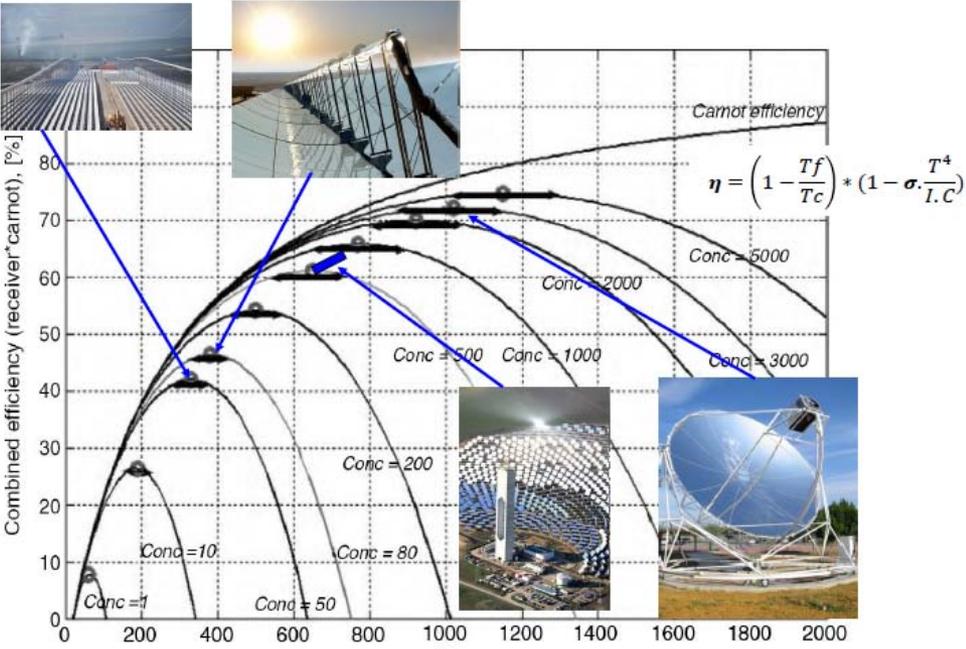
Stockage sensible :
Laboratoire PROMES,
Laboratoire RAPSODEE
CEA LITEN

Stockage thermique massif pour les centrales thermodynamiques



Fluides caloporteurs utilisés

- T** ↓
- Huile synthèse
 - Generation direct de vapeur
 - Sels fondus
 - Gaz



Stockage thermique massif pour les centrales thermodynamiques



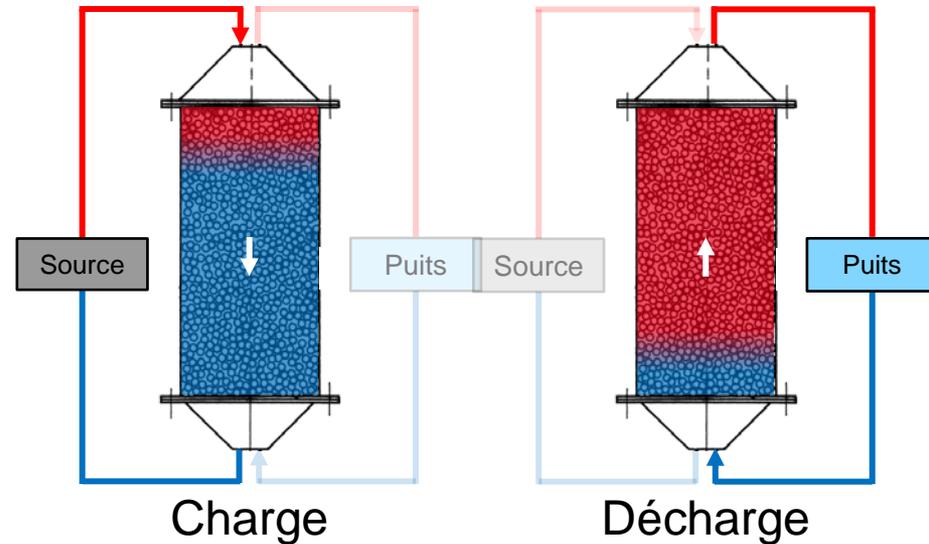
Stockage à 2 réservoirs

- Liquide caloporteurs (sels fondus)
- nombreux retours d'expérience ;
- système facile à piloter ;
- séparation des fluides chauds et froids.
- PB disponibilité matériaux...

Régénérateur fluide/solide (thermocline) :

fluide caloporteur : gaz ou liquide

- un seul réservoir ;
- remplacement de grandes quantités de fluide par des solides peu coûteux ;
- réduction de l'investissement (- 35 % sur la partie stockage) ;
- meilleure densité de stockage (+ 45 %)



Stockage thermique massif pour les centrales thermodynamiques

1^{er} enjeu : les matériaux

Stockage Vrac



ALSOLEN CADARACHE

CEA LITEN
JEAN-FRANÇOIS FOURMIGUÉ, ARNAUD BRUCH
THIBAUT ESENCE, RAPHAËL COUTURIER, SOPHIE MOLINA

Stockage structuré



Déchets d'amiante



Torche
plasma



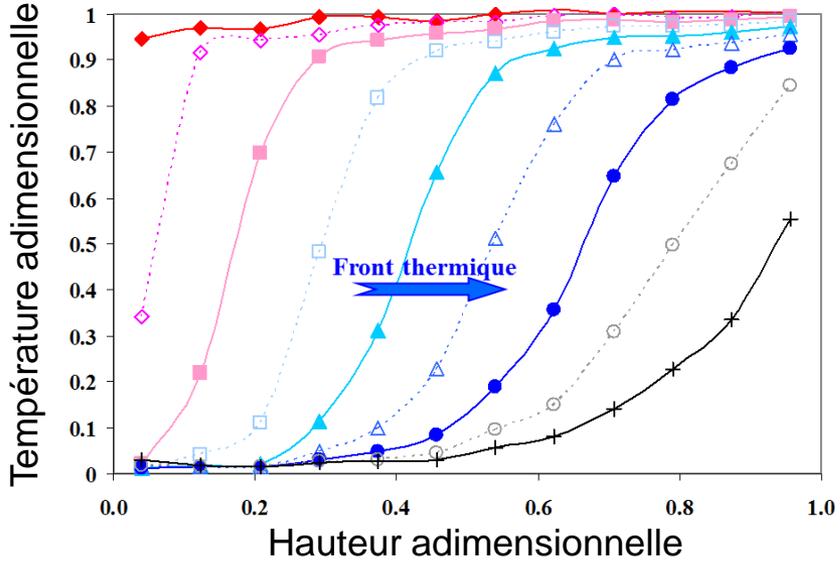
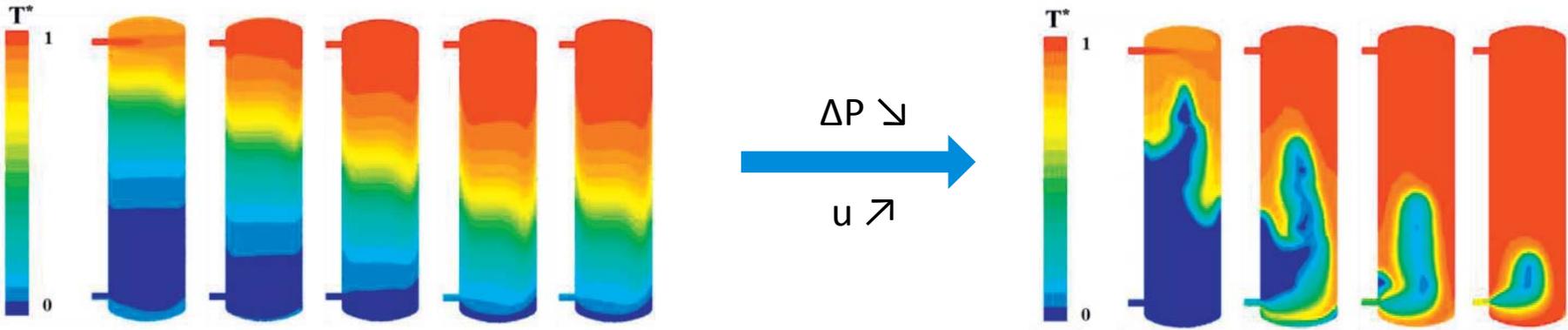
Matériaux
céramique HT



LABORATOIRE PROMES
RÉGIS OLIVÈS
COL. : XAVIER PY, VINCENT GOETZ, QUENTIN FALCOZ,
NAJIM SADIKI
DOC. : A. MEFFRE, A. KERE, G. DEJEAN, J.F. HOFFMAN, N.
CALVET, T. NAHAS, D VERDIE

Stockage thermique massif pour les centrales thermodynamiques

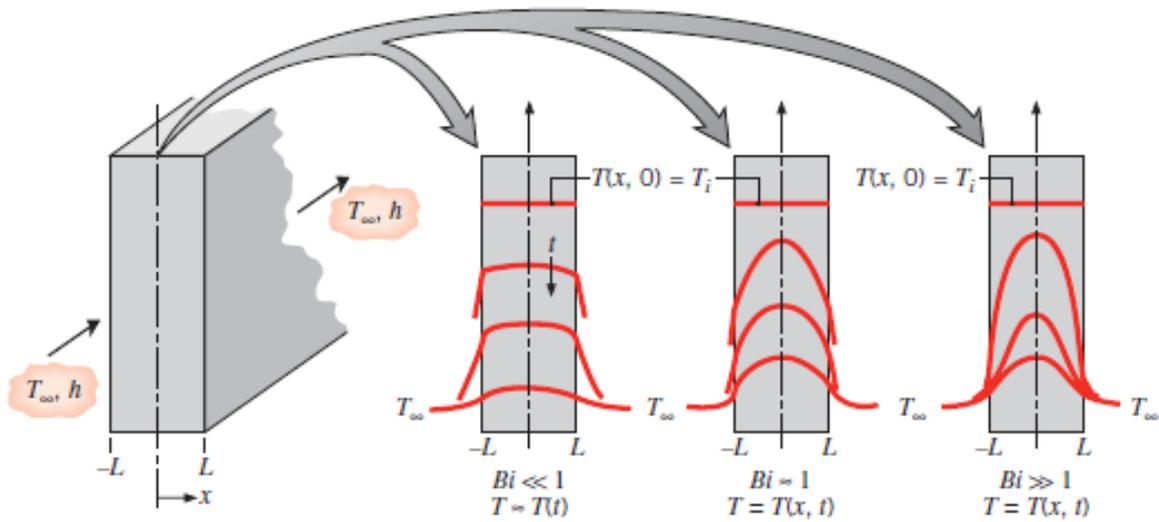
2^{ème} enjeu : stratification



Stockage de l'énergie pour les centrales thermodynamiques

DÉVELOPPEMENT DU GRADIENT THERMIQUE :

- diffusivité du milieu (fluide + sable + roche)
- Écoulement (turbulence)
- Inertie thermique du lit de roche



$$Bi = \frac{hL_{car}}{\lambda} < 0,1$$

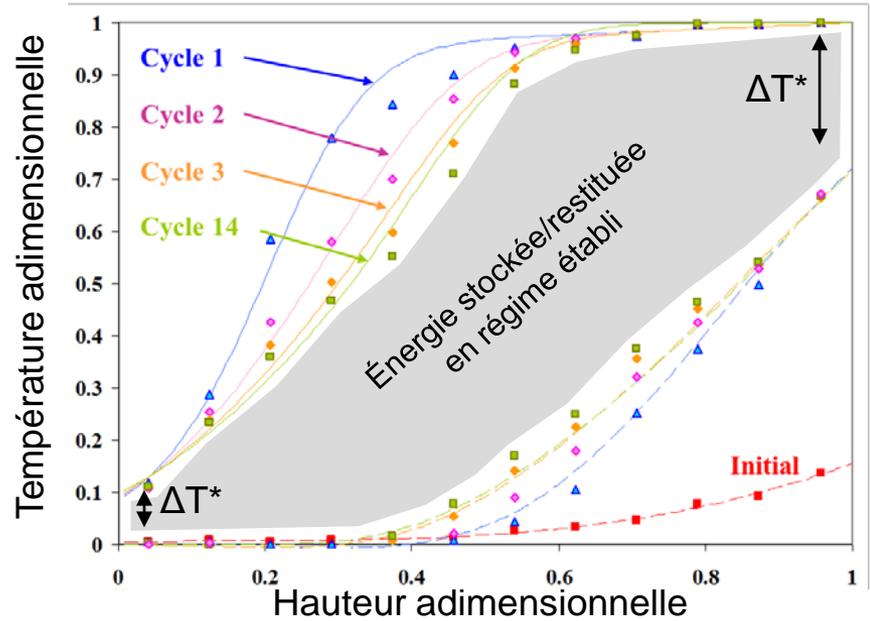
Fundamentals of heat & mass transfer

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-BiFo}$$

$$BiFo = \frac{hA_s t}{\rho V C_p}$$

Stockage thermique massif pour les centrales thermodynamiques

3^{ÈME} ENJEU : RENDEMENT DE CYCLE

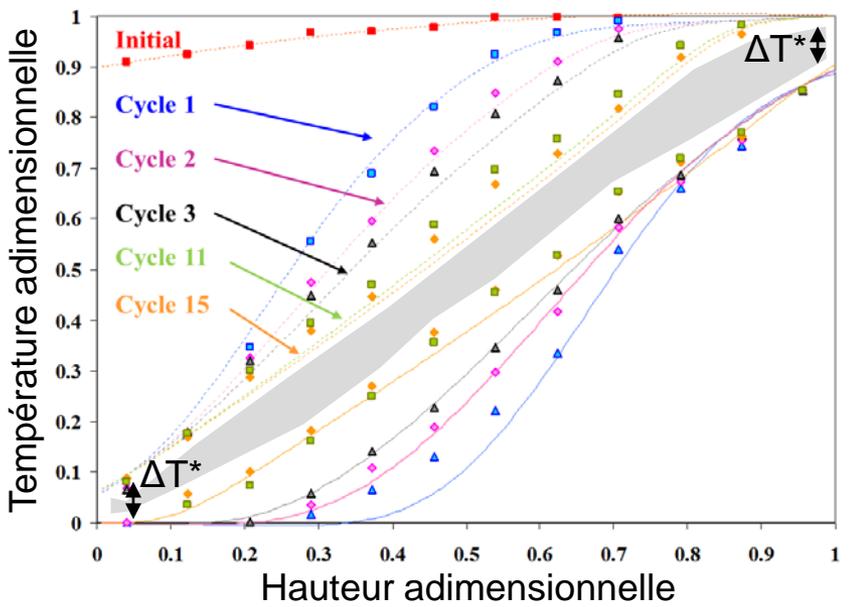


Cycles de charge/décharge successifs en condition identique :

- établissement d'un régime périodique ;
- profils de fin de charge/décharge stables et répétables au bout d'un certain nombre de cycles.

Les critères de fin de charge/décharge (ΔT^*) gouvernent le régime établi :

- plus le critère est strict (ΔT^* petit), plus le taux d'utilisation du réservoir (aire grisée) est faible ;
- plus le critère est strict, plus il faut de cycles avant d'atteindre le régime périodique établi.



CONCLUSIONS

- Avantages techniques, économiques et écologiques des régénérateurs fluide/solide par rapport aux stockages à 2 réservoirs en sels fondus ;
- Les régénérateurs fluide/solide sont des **systems robustes, contrôlables et prédictibles** qui répondent aux impératifs du stockage en centrale solaire.
- Matériaux vrac : problème de cric thermique
 - Mise en place de lits séparés (CEA LITEN)
 - Stockage structurés (PROMES)

Stockage industriel procédé batch



Stockage latent

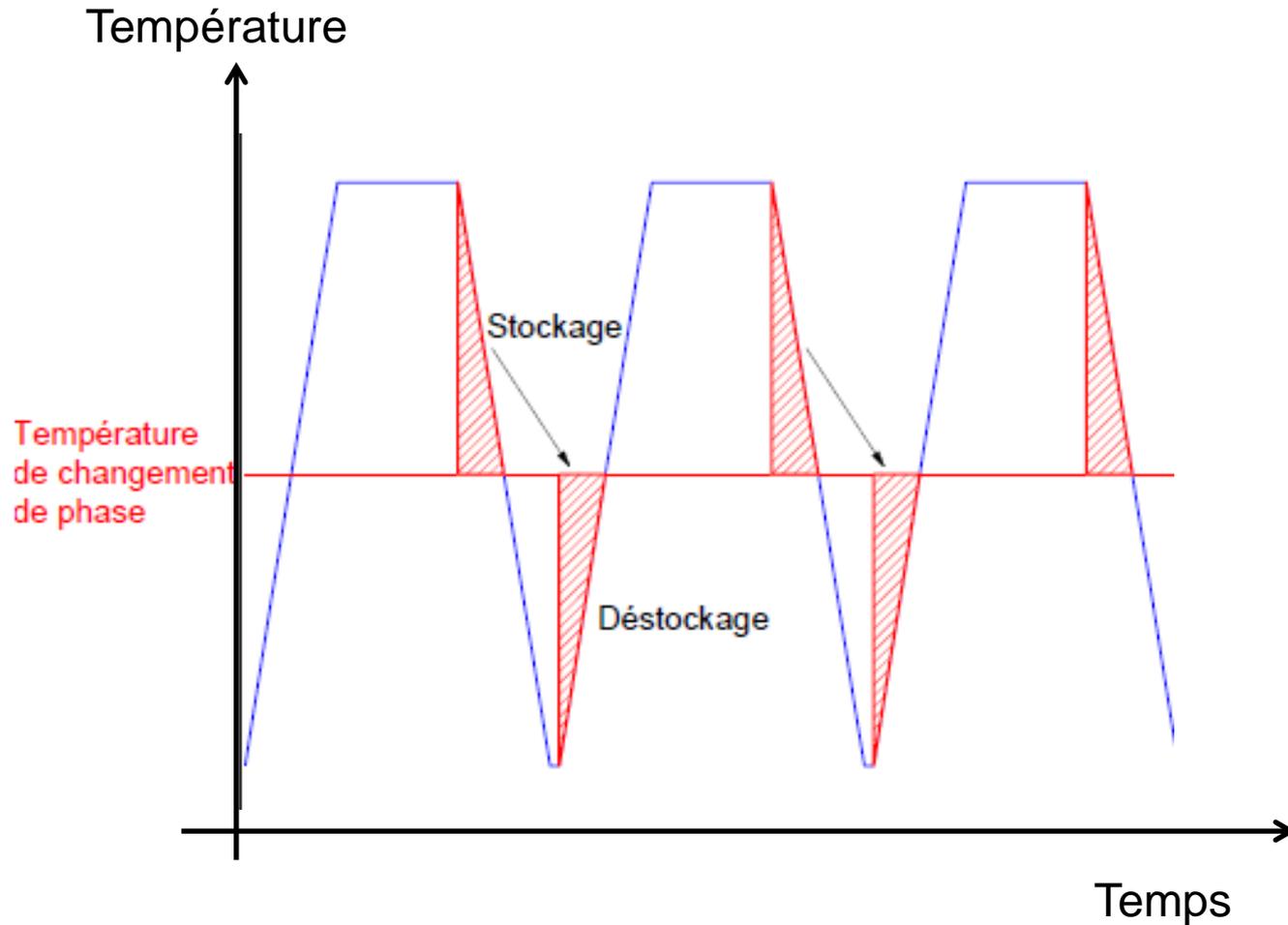
$$E_{car} = 100 \text{ kWh} ; P_{car} = 1 \text{ MW} ;$$
$$T_{car} = 100 \text{ °C} ; t_{car} = 1 \text{ h}$$

Laboratoire LTeN & ICAM

J. Soto, D. Delaunay

Doc: K. MERLIN

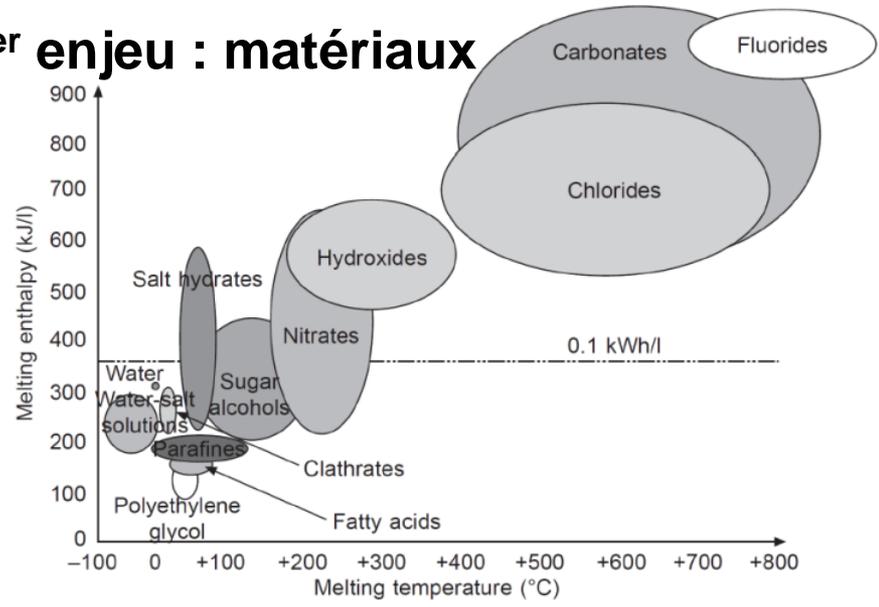
Stockage industriels procédé batch



Stockage d'une partie de l'énergie thermique lors des phases de refroidissement pour la montée en température du cycle suivant

Stockage industriels procédé batch

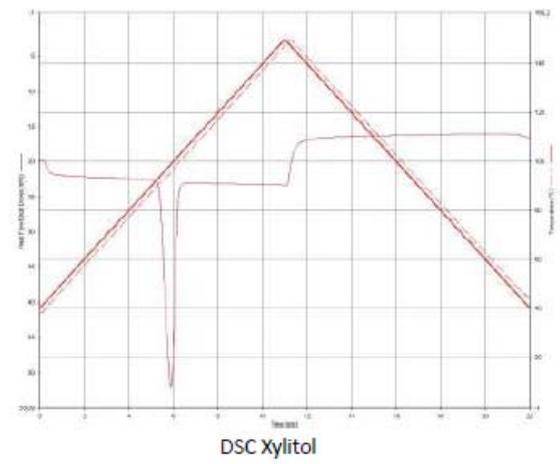
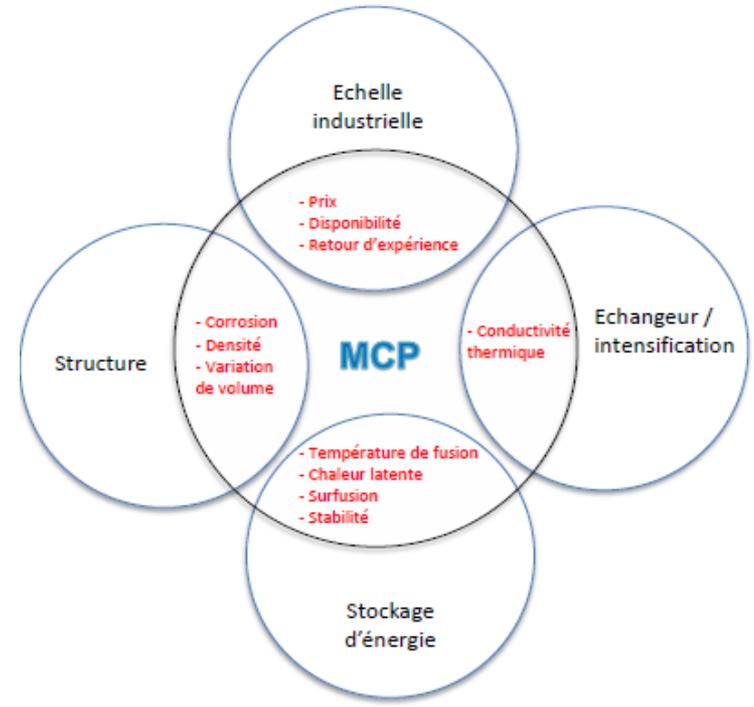
1^{er} enjeu : matériaux



Température de fusion et enthalpie de fusion des familles de MCP (ZAE Bayern)

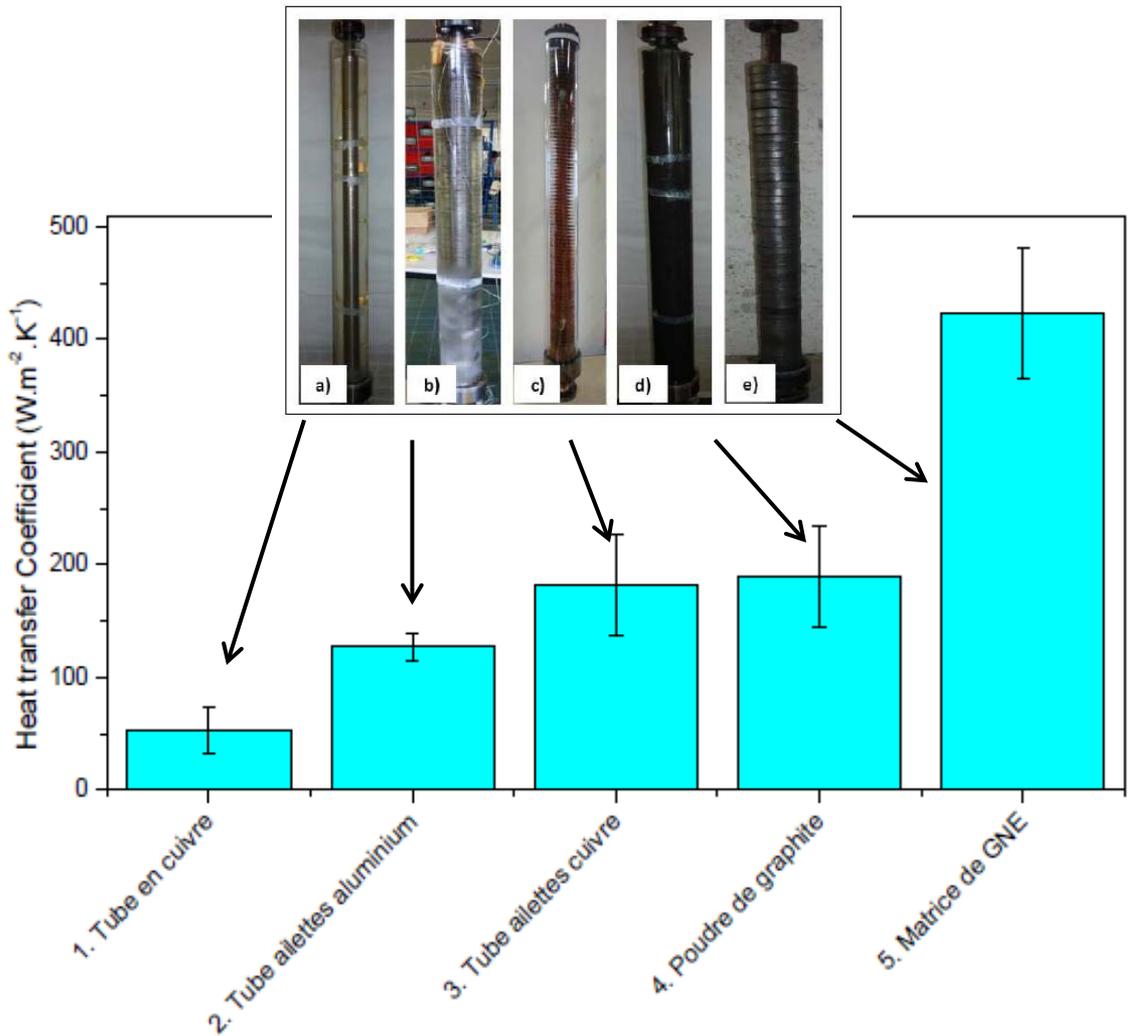


Surfusion et enthalpie de changement de phase :
Laboratoire LATEP, LGCGE, CETHIL



Stockage industriels procédé batch

2^{ier} enjeu : transferts thermiques



Merlin et al. (2016)

Essais en régime laminaire
(Pr = 160, Re = 1830)

Temps de fusion total :

- a) 3 heures (tube lisse cuivre)
- b) 2 heures (tube ailettes aluminium)
- c) 50 min (tube ailettes cuivre)
- d) 40 min (poudre de graphite)
- e) 20 min (GNE)

Graphite naturellement expansé
Laboratoire PROMES

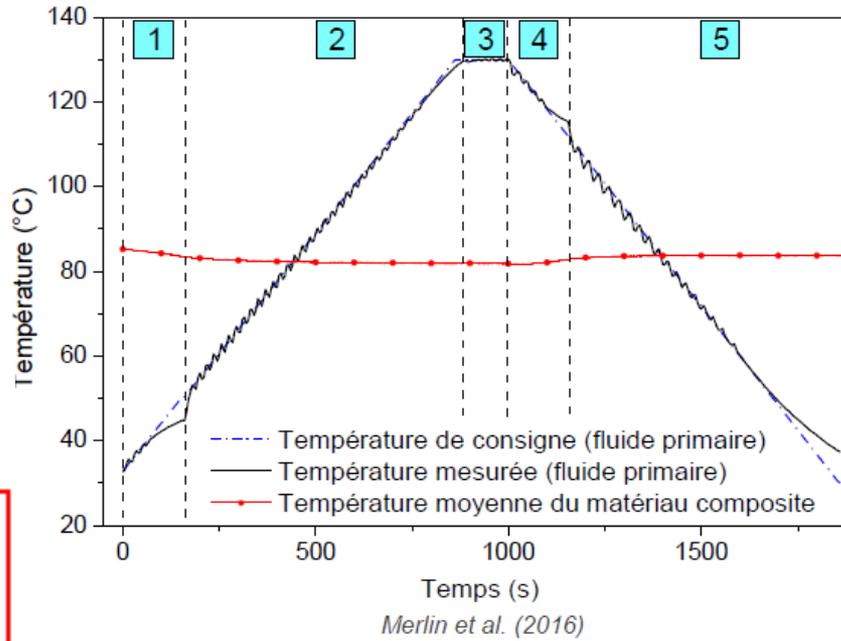
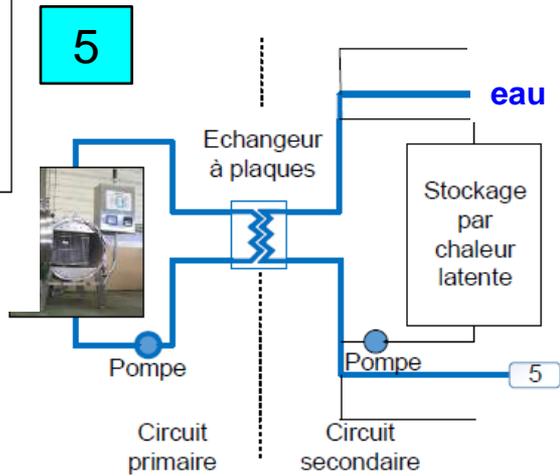
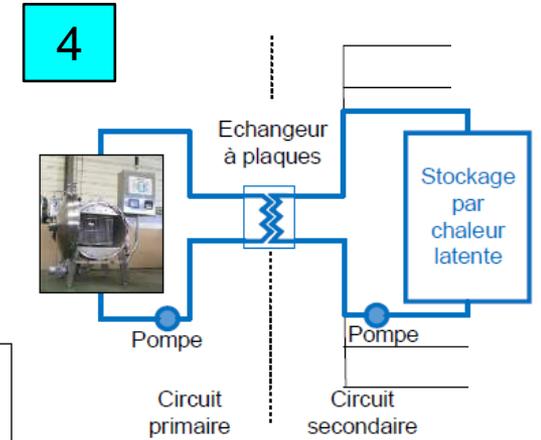
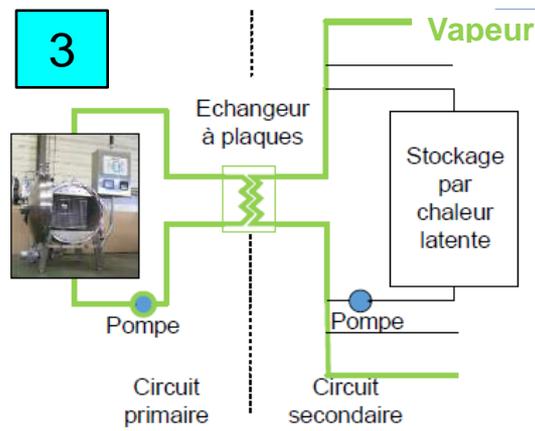
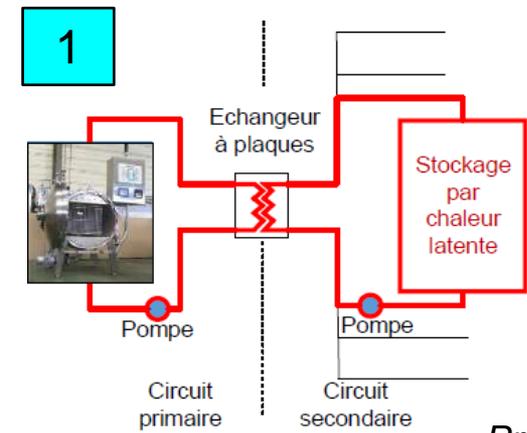
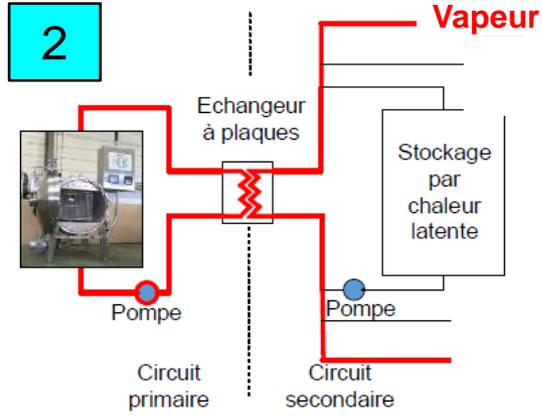
Stockage forte puissance pour procédés industriels



*Prototype développé par le Laboratoire LTeN & ICAM
J. Soto, D. Delaunay, K. MERLIN*

Présentation J. Soto ; Workshop FedEsol 2017

3^{ème} enjeu : Process

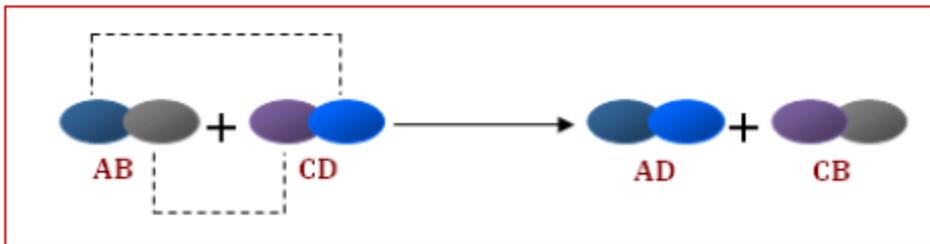


Gains de 10% en énergie

Présentation J. Soto ; Workshop FedEsol 2017

CONCLUSIONS

- Mise en place de procédés de stockage de l'énergie thermiques dans les procédés industriels : **valable pour des fréquences de cycle élevés**
- Les matériaux à changement de phase permettent des densité énergétique sensiblement plus importantes / stockage sensible (compacité de système ; réduction des pertes thermiques)
- **La surfusion reste un élément clef. De très fortes surfusions peuvent être intéressantes pour du stockage à long terme à condition de pouvoir maîtriser la rupture de surfusion** (*Laboratoire I2M – H. Palomo*)
- Apparition de nouveaux matériaux de plus haute densité énergétique se **comportant comme des MCP mais siège de réaction chimiques : les péritectiques** (*Laboratoire I2M – E. Palomo*)



Présentation E. Palomo; Workshop FedEsol 2016

réactions chimiques réversible à température constante dans lesquelles une phase liquide (L) réagit avec au moins une phase solide (α) pour former une nouvelle phase solide (β).

Stockage intersaisonnier de l'énergie solaire



Stockage thermochimique

$E_{car} = 1 \text{ MWh}$; $P_{car} = 3 \text{ kW}$;

$T_{car} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $t_{car} = 4 \text{ mois}$

Laboratoire LOCIE

N. Le Pierrès, B. Stutz

Doc F. Huaylla-Roque

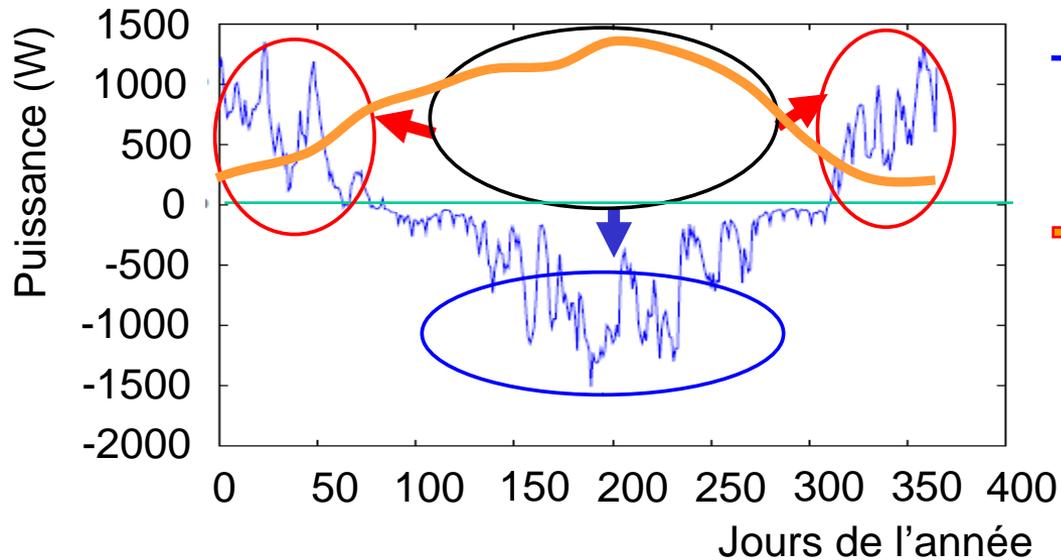
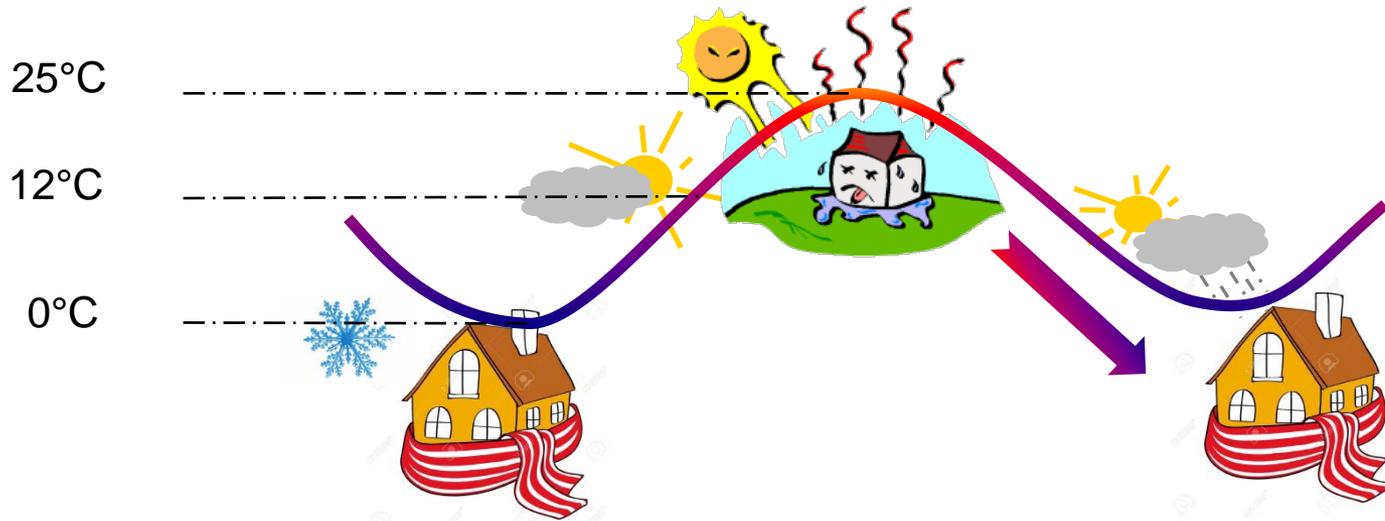
Laboratoire PROMES

N. Mazet

Laboratoire CETHIL

F. Kuznik

Stockage intersaisonnier de l'énergie solaire par sorption

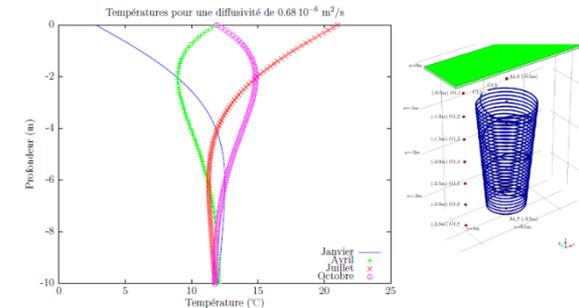
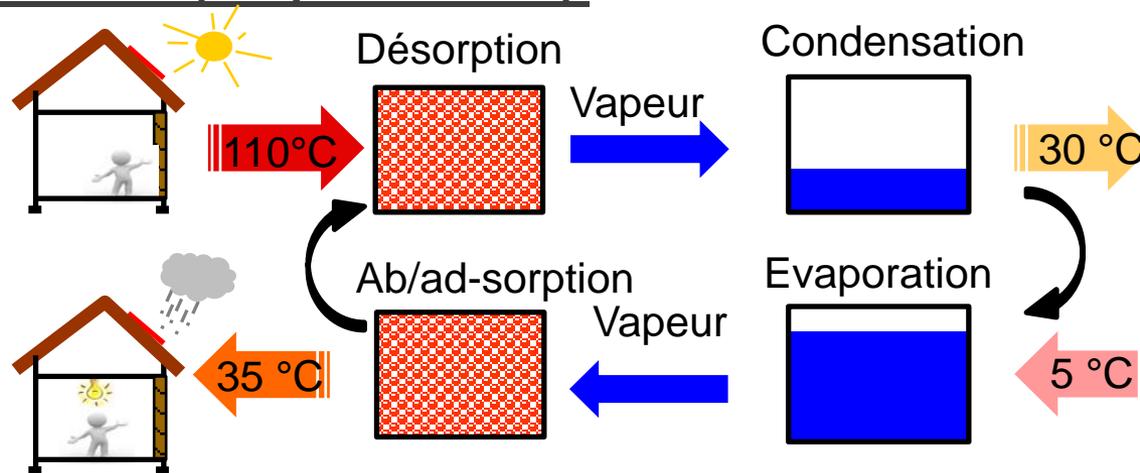


- **Besoin chauffage / rafraîchissement maison RT2012 - 120 m² Chambéry**
- **Ensoleillement moyen sur 6,5 m² de capteur solaire**

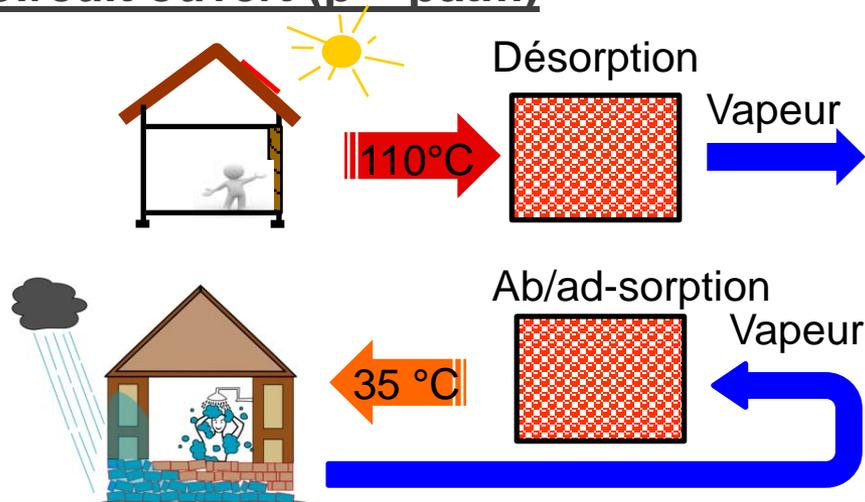
Stockage intersaisonnier de l'énergie solaire par sorption

1^{er} enjeu : système

Circuit fermé ($6 < p < 30$ mbar)



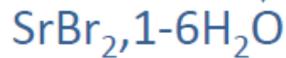
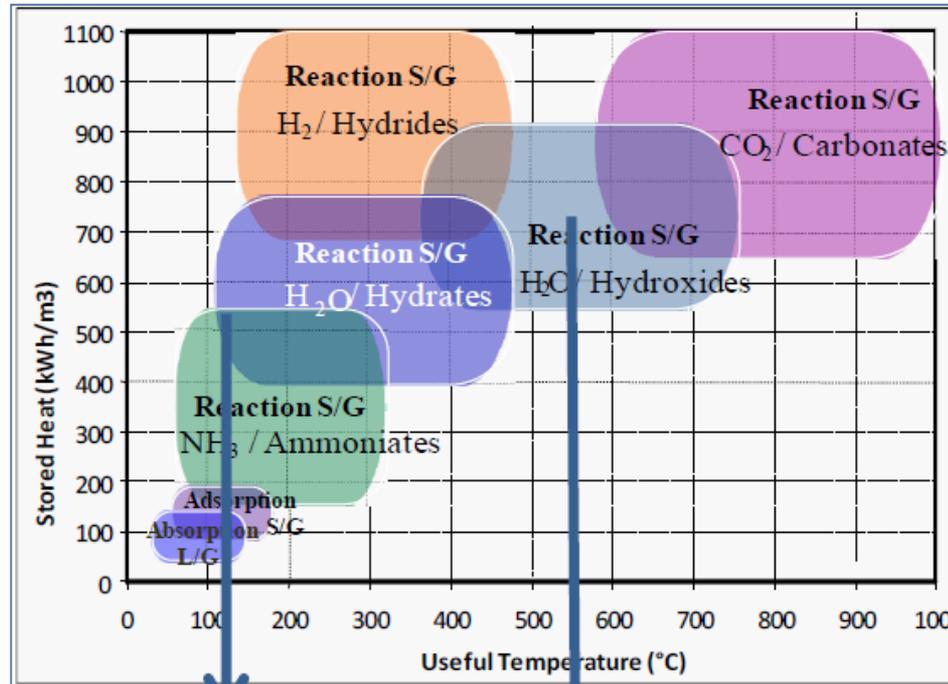
Circuit ouvert ($p = p_{atm}$)



La génération de vapeur à basse température constitue un enjeu des systèmes de stockage à sorption

Stockage intersaisonnier de l'énergie solaire par absorption

2^{ème} enjeu : matériau



Stockage intersaisonnier

$T < 80^\circ\text{C}$

ANR Stock-E ESSI



Stockage pour CSP

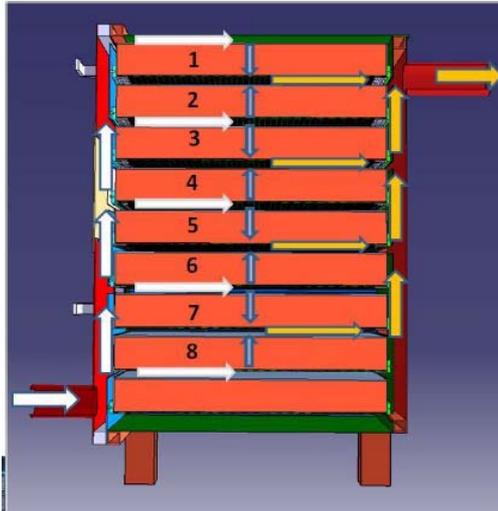
$400-500^\circ\text{C}$

ANR SEED In-STORES

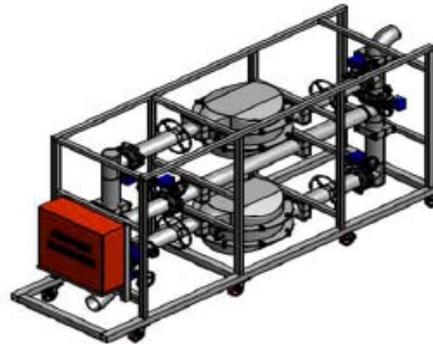
Présentation N. Mazet; Workshop FedEsol 2016

Stockage intersaisonnier de l'énergie solaire par sorption

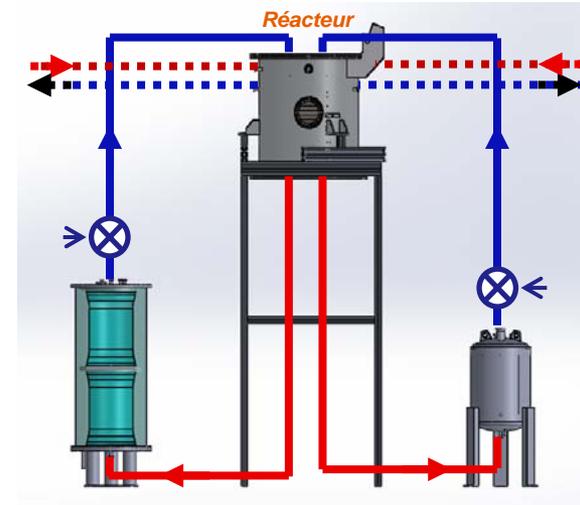
3^{ème} enjeu : composant



Thermochimie - PROMES



Adsorption physique CETHIL



Absorption LOCIE

Stockage intersaisonnier par sorption

- Volume de stockage encore important ($R = 1,5 \text{ m}$; $H = 2,5 \text{ m}$)

Verrous scientifiques et techniques

- Matériaux : choix du couple (disponibilité, prix, ...), Gestion de la cristallisation : Compatibilité matériaux ; Vieillessement
- Composant : Compacité des échangeurs (intensification des transferts)
- **Système : Génération de vapeur (source chaleur BT)**

Avenir des systèmes de stockage par absorption

- Vers un stockage limité ($2\text{-}3 \text{ m}^3$) permettant l'effacement en période de forte tension énergétique (12 jours les plus tendus de l'année)
- Vers des systèmes multifonctionnels : chauffage & rafraichissement



Merci pour votre attention !