

Stockage d'énergie thermique dans les centrales électrosolaires

LABORATOIRE
PROCÉDÉS, MATÉRIAUX
et ENERGIE SOLAIRE

UPR 8521 du CNRS.
conventionnée avec
l'université de Perpignan

PROCESSES, MATERIALS
and SOLAR ENERGY
LABORATORY



Régis Olivès

X. Py

V. Goetz

Q. Falcoz

N. Sadiki

Sommaire

Stockage thermique : chaleur sensible, chaleur latente, matériaux/applications

Centrales électrosolaires et objectifs de l'AIE

Matériaux de stockage :
caractéristiques, performances, impacts environnementaux, ressources



Différents modes de stockage de l'énergie

stockage
mécanique

stockage
électrique

stockage
chimique

stockage
thermique

potentiel

cinétique

électrostatique

magnétique

électrochimique

biofuels

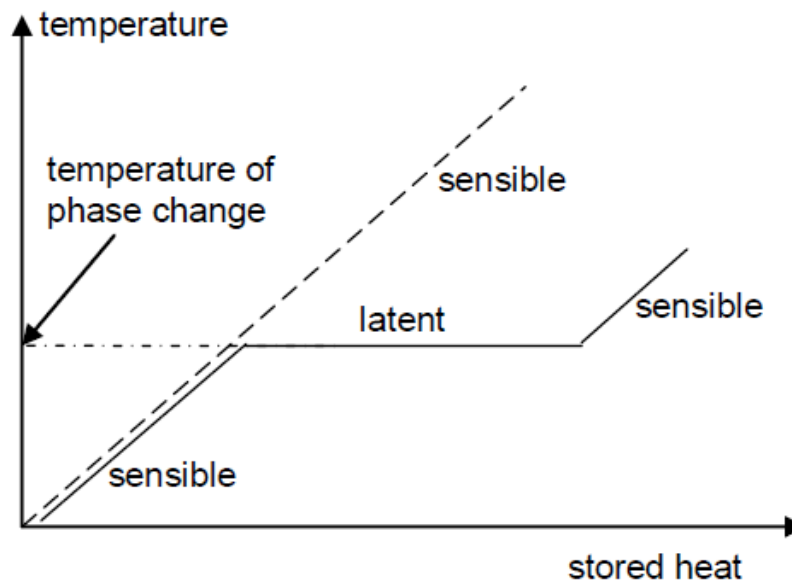
thermochimique

chaleur sensible

chaleur latente



Stockage thermique



$$Q_{sensible} = m.C_p.\Delta T$$

$$Q_{latent} = m.L_{pc}$$

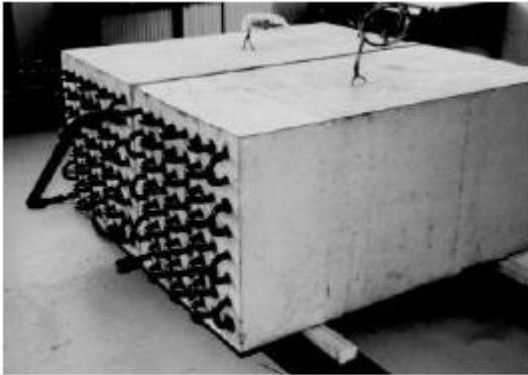
	MJ/m ³	kJ/kg	Comment
Sensible heat			
granite	50	17	$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
water	84	84	$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Latent heat of melting			
water	306	330	melting temperature 0 °C
paraffins	180	200	melting temperatures 5 °C – 130 °C
salt hydrates	300	200	melting temperatures 5 °C – 130 °C
salts	600 - 1500	300 - 700	melting temperatures 300 °C – 800 °C



Problématiques du stockage définir avant tout...

- **Fonctionnalités** : stockeur, isolant (par inertie), limiteur de T, tampon, absorbeur...
 - **Matériaux** : propriétés, élaboration, composites, surfusion, mélanges binaires, stabilité thermique et chimique, coût, disponibilité, inflammabilité, PCM multi-T, toxicité, recyclabilité...
 - **Enveloppe** : corrosion, tenue mécanique, échange fluide/matériau, encombrement, connexions,...
 - **Intégration du matériau** : encapsulation, en calandre,...
 - **Intégration** dans le procédé d'application : où, comment,...
 - **Modélisation, simulation** : échelles du matériau, du stock, du procédé,...
 - **Intérêts du stockage** : réduction des coûts, analyse de cycle de vie, contenu énergétique (payback), critères de pertinence
 - **Gestion du stockage** : télégestion, SAV, alarmes,...
- 

Stockage par chaleur sensible



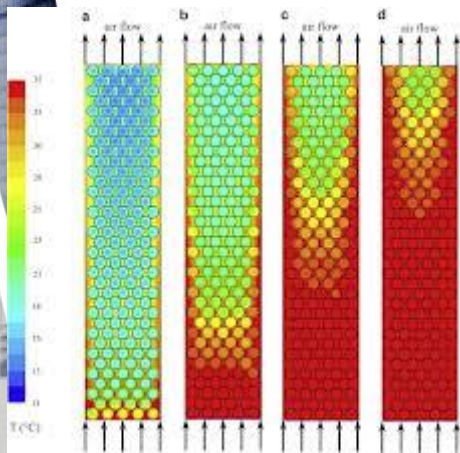
CONTEST Concrete Storage Probes

Avantages

Faibles coûts,
Fabrication aisée,
Propriétés thermophysiques,
Disponibilité des matériaux,
Process simple.

Inconvénients

Température de stockage variable
Pertes
Faible densité énergétique





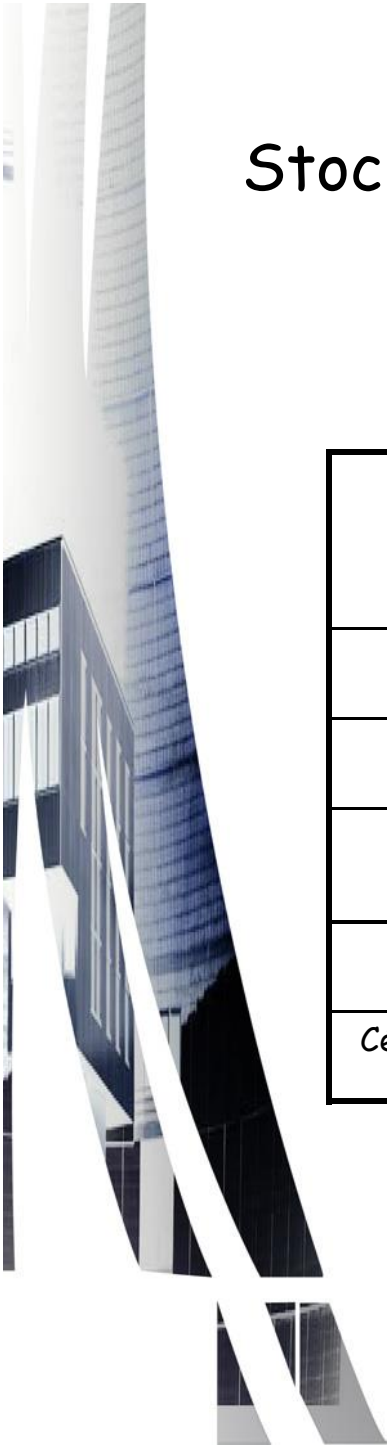
Matériaux Fluides

peuvent être utilisés comme stockeur et caloporteur (moins d'échangeurs)
eau pour l'ECS (bon marché, le plus commun, bonne capacité, corrosion)

- eau, eau + adjuvants (ECS)
- huiles ($T < 400^{\circ}\text{C}$) centrales électriques solaires en CP
- sels fondus ($T > 400^{\circ}\text{C}$) centrales électriques solaires à tour
- métaux fondus (550°C sodium)
- vapeur d'eau (250°C centrale PS10 Séville)
- coulis de glace
- suspension micronodules

Propriétés thermophysiques

matériau	Masse volumique kg/m ³	Cp J/(kg K)	λ W/(m K)	Capacité volumique kWh/(m ³ K)
Eau liquide	1000	4186	0.6	1.16
Eau vapeur	-	1864-→	0.018-→	-
Huile	700-900	1700-2700	0.1-0.7	0.33 ÷ 0.68
Sel fondu	900-2600	1500	0.15-2.0	0.37 ÷ 1.08



Stockage par chaleur sensible sur Matériaux Solides

matériau	Masse volumique kg/m^3	C_p $\text{J}/(\text{kg K})$	λ $\text{W}/(\text{m K})$	Capacité Volumique $\text{kWh}/(\text{m}^3 \text{ K})$
Roche	2150-2680	745-1105	2.15-5.38	0.44 ÷ 0.82
sable	1515	800	0.27	0.28
Brique réfractaire	2050-2645	960	1-1.8	0.54
Béton HT	2750	916	1.0-1.75	0.7
Céramiques HT	3500	866	1.35	0.84

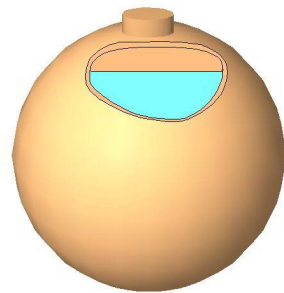
Stockage par chaleur latente

Avantages principaux

- (1) Forte capacité de stockage
- (2) Température auto-régulée
- (3) Système modulaire
- (4) Grande variété de T de travail

Inconvénients

- (1) Choix du matériau imposé par T
- (2) Faibles conductivités thermiques
- (3) Surfusion
- (4) Corrosion
- (5) Stabilité thermique et chimique
- (6) Toxicité
- (7) Inflammabilité
- (8) Prix et disponibilité





Familles de matériaux de stockage

(1) Solutions aqueuses de sels et eau

basses T, pas cher
surfusion, corrosion,

(2) PCM organiques (chimie du carbone)
alcanes, paraffines, polyols, polymères, é

+ chers, inflammables, surfusion (polyols)
stables, inertes, faciles

(3) PCM inorganiques (sans carbone)
sels : chlorures, sulfates, nitrates, é
et mélanges binaires, ternaires, é

fortes capacités, moyennes à hautes T,
nombreux, prix, disponibilité
corrosion, toxicité,

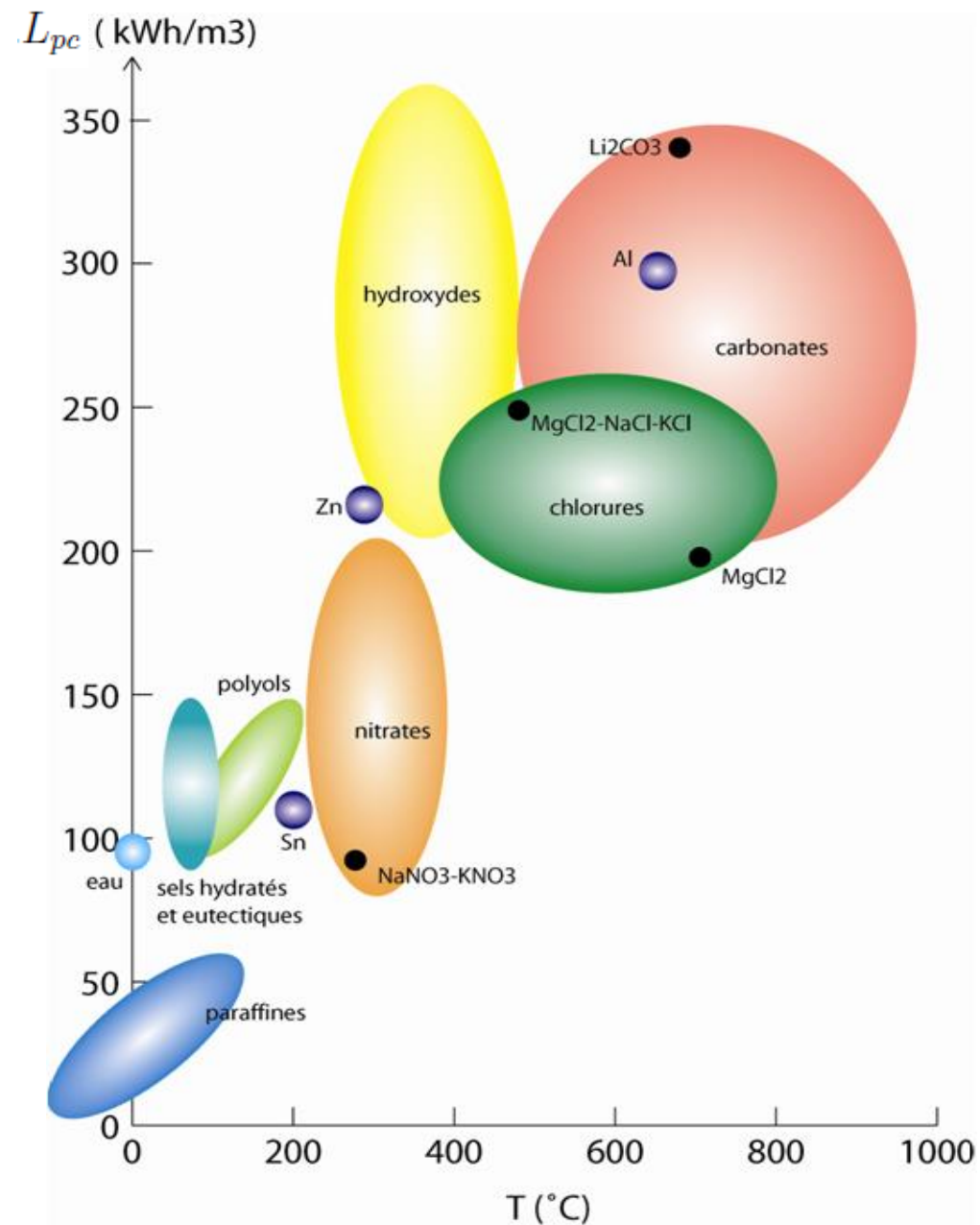
(4) Métaux

lourds, chers, capacité
conductivité, hautes T



PCM (Phase Change Material)

Stockage par chaleur latente

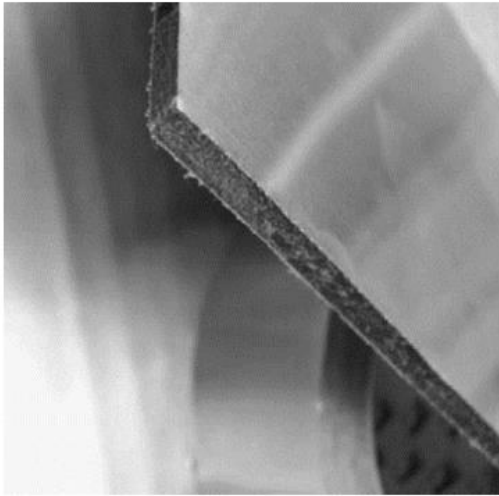


Principaux fabricants de PCM dans le monde

Manufacturer	PCM temperature range	Number of PCM's listed
RUBITHERM (www.rubitherm.de)	– 3 °C to 100 °C	29
Cristopia (www.cristopia.com)	– 33 °C to 27 °C	12
TEAP (www.teappcm.com)	– 50 °C to 78 °C	22
Doerken (www.doerken.de)	– 22 °C to 28 °C	2
Mitsubishi Chemical (www.mfc)	9.5 °C to 118 °C	6
Climator (www.climator.com)	– 18 °C to 70 °C	9
EPS Ltd (epsltd.co.uk)	– 114 °C to 164 °C	61
Merck		



Des PCM dans l'habitat...

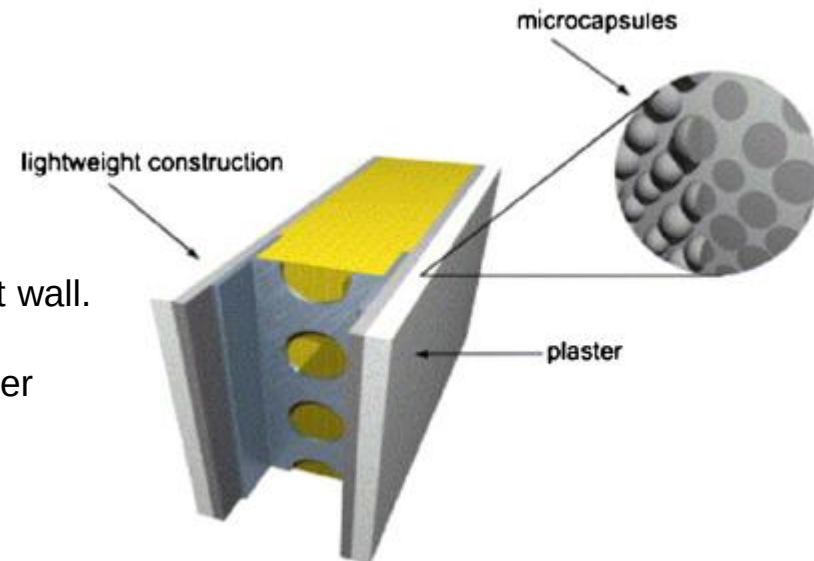


Dupont de Nemours PCM composite wallboard, composed of 60% of microencapsulated Paraffin (Kuznik et al.)



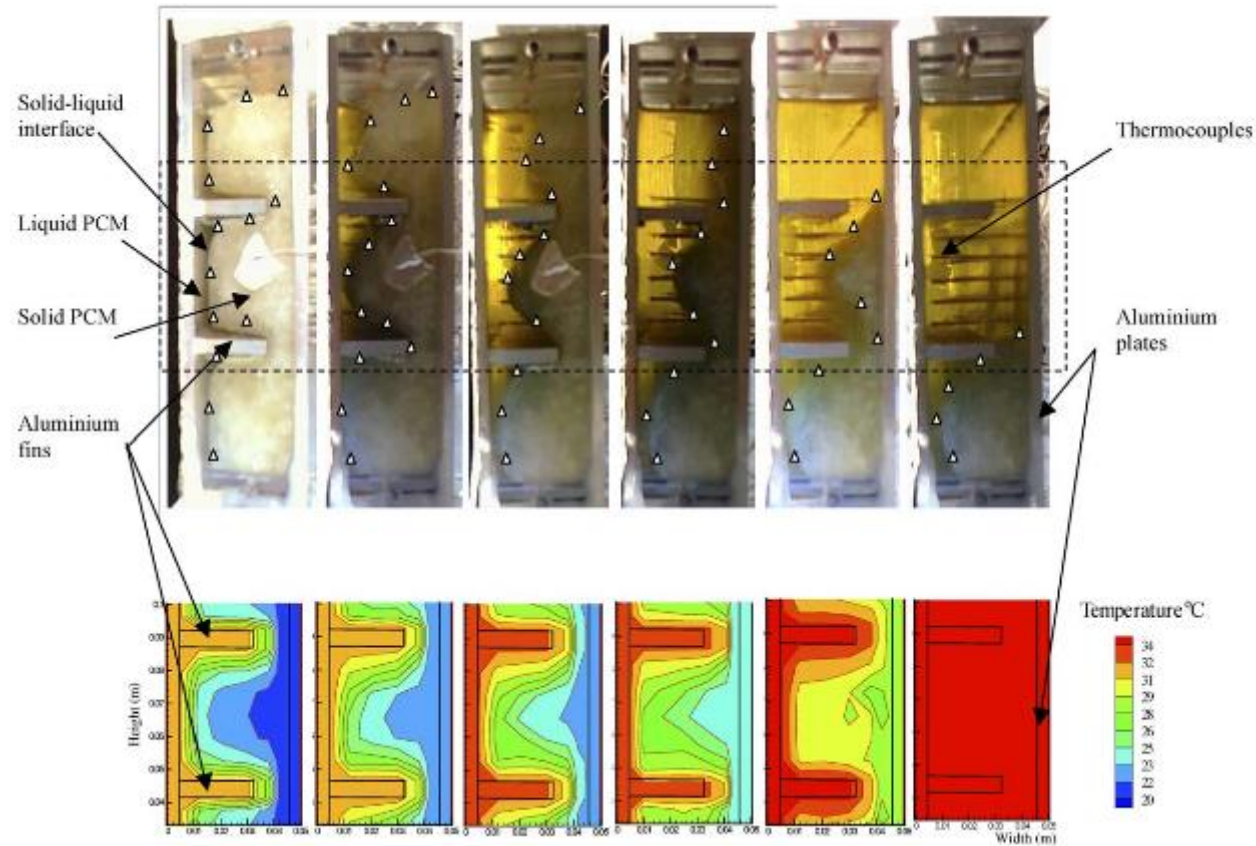
Clay bricks with PCM macrocapsules (Silva et al.)

Schematic view of a lightweight wall. The PCM micro-capsules are integrated into the interior plaster (Schossig et al.)





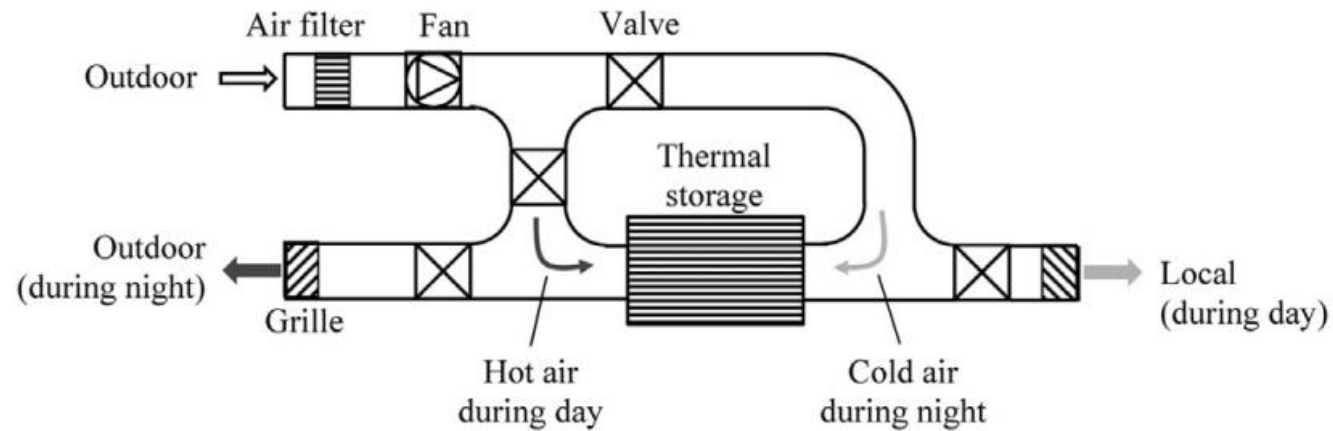
PCM pour le maintien en T



Images et champ de température à l'arrière d'un panneau PV muni d'ailettes et d'un PCM durant le changement de phase

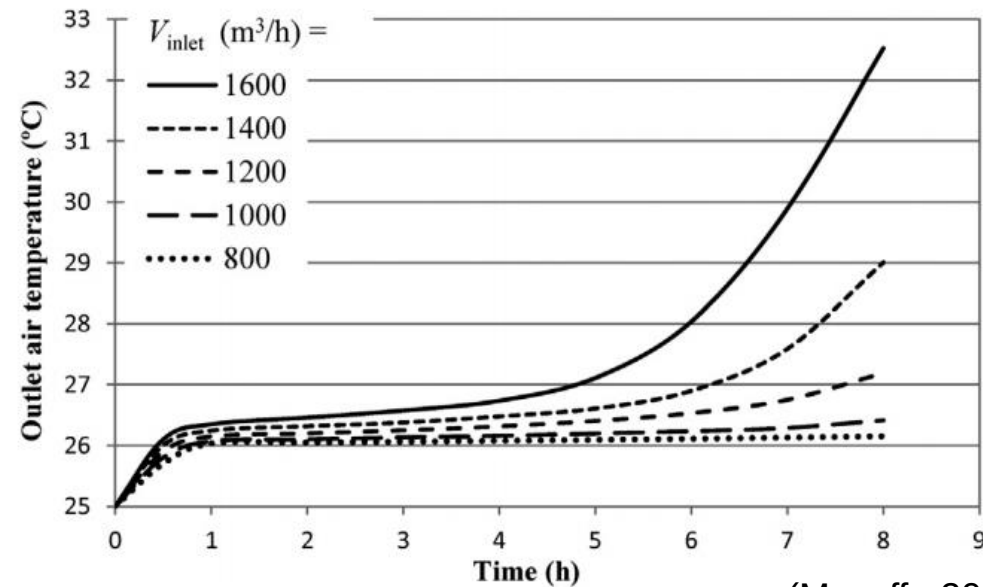
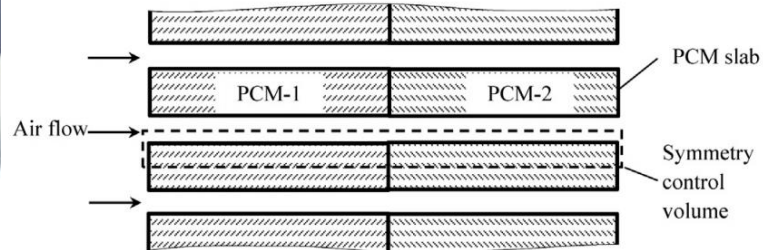
(M.J. Huang et al.)

Free cooling et stockage thermique



$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} + \text{RT25}$

Effet du débit d'air sur la température de l'air en sortie durant une journée ($T_{\text{inlet}} = 36^\circ\text{C}$).



(Mosaffa 2014)

Applications fortes puissances, hautes températures

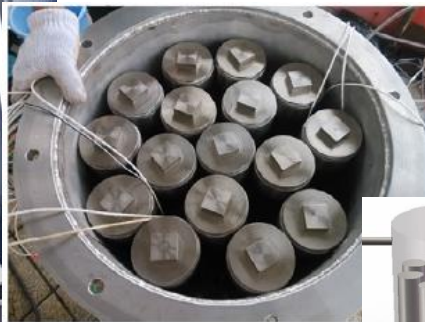
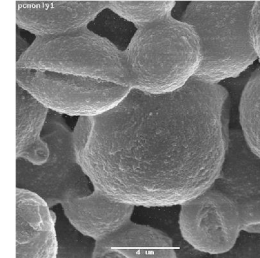
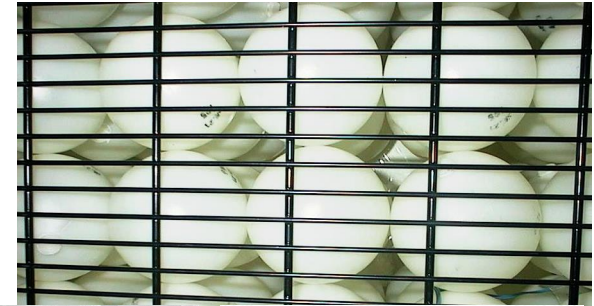
3 Intensification des transferts thermiques → surfaces d'échange

Nodules

Micro-nodules

Ailettes

Tubes corrugués...



Applications fortes puissances, hautes températures

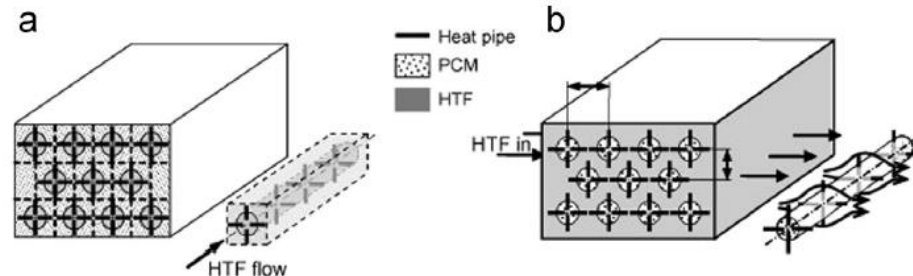
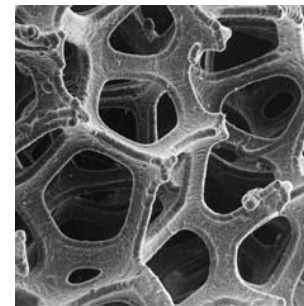
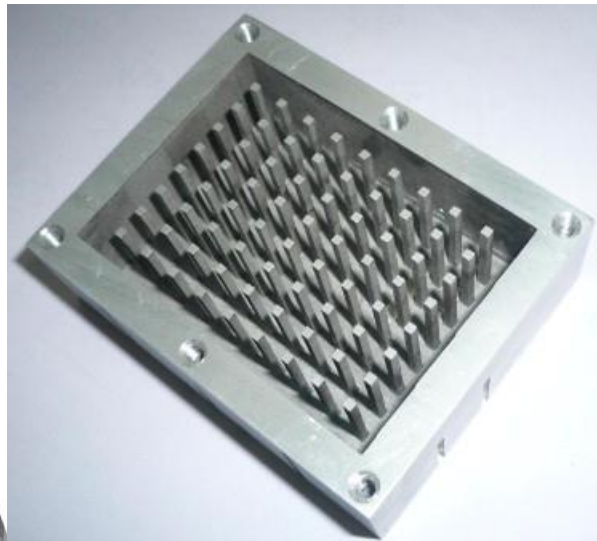
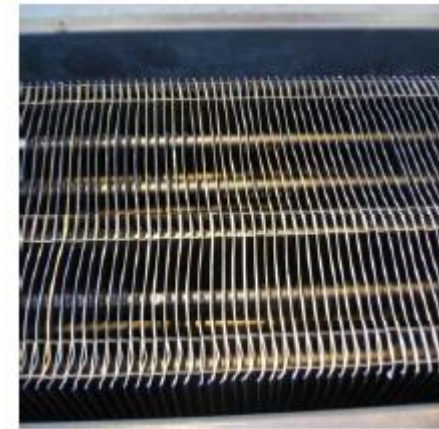
3 Intensification des transferts thermiques → Augmentation de la conductivité thermique effective

Ailettes internes

Mousses métalliques

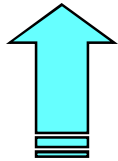
Composites

Heat pipes

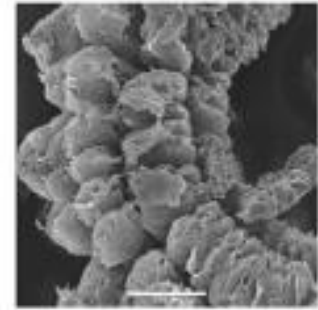
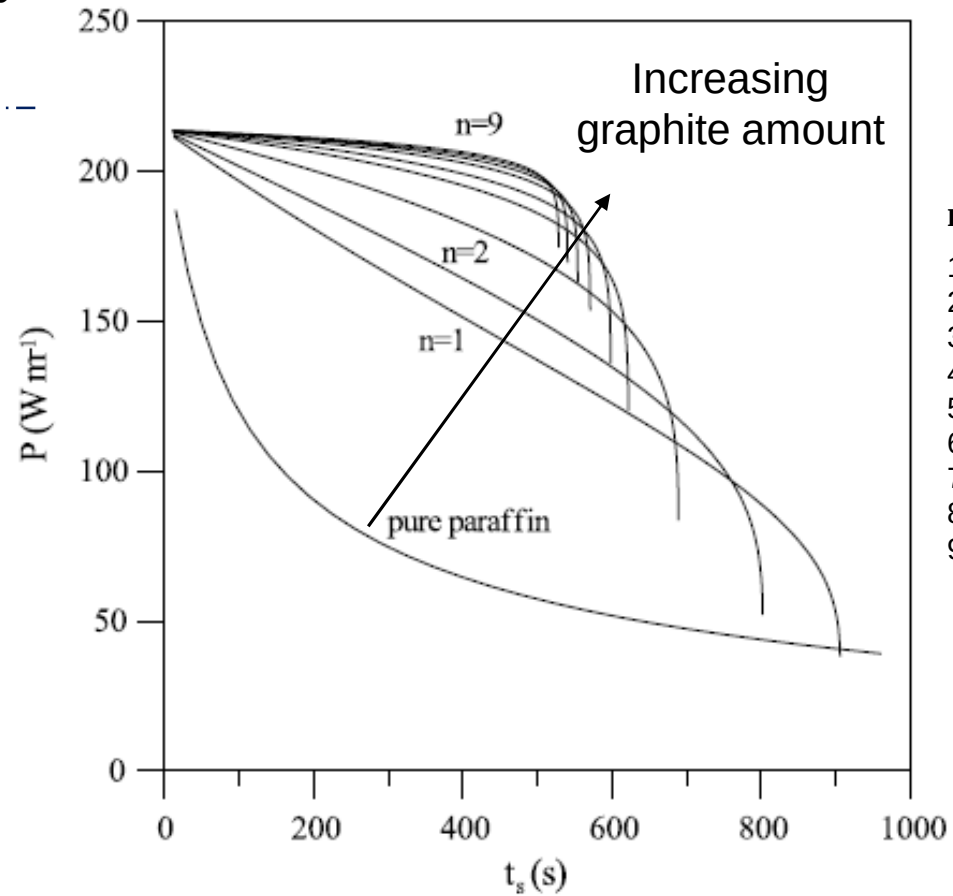


Puissance thermique linéique (W/m)

Cylindrical geometry

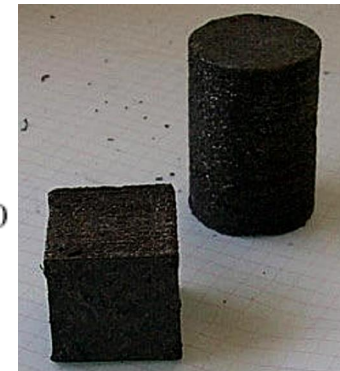


$\Delta T = 10 \text{ K}$,
 $h_{\text{ext}} = 200 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$

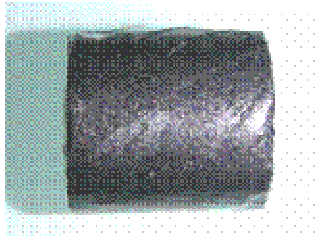


n %graphite

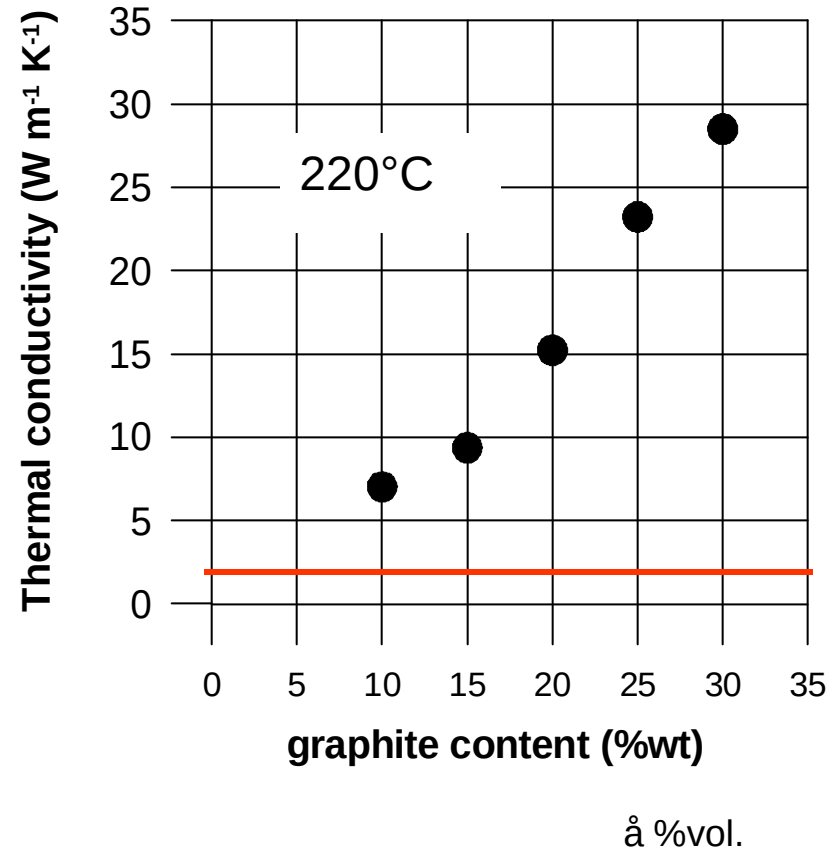
1	2.2
2	2.9
3	4.6
4	7.2
5	8.9
6	11.5
7	13.3
8	15
9	16.6



Matériaux pour le stockage haute température

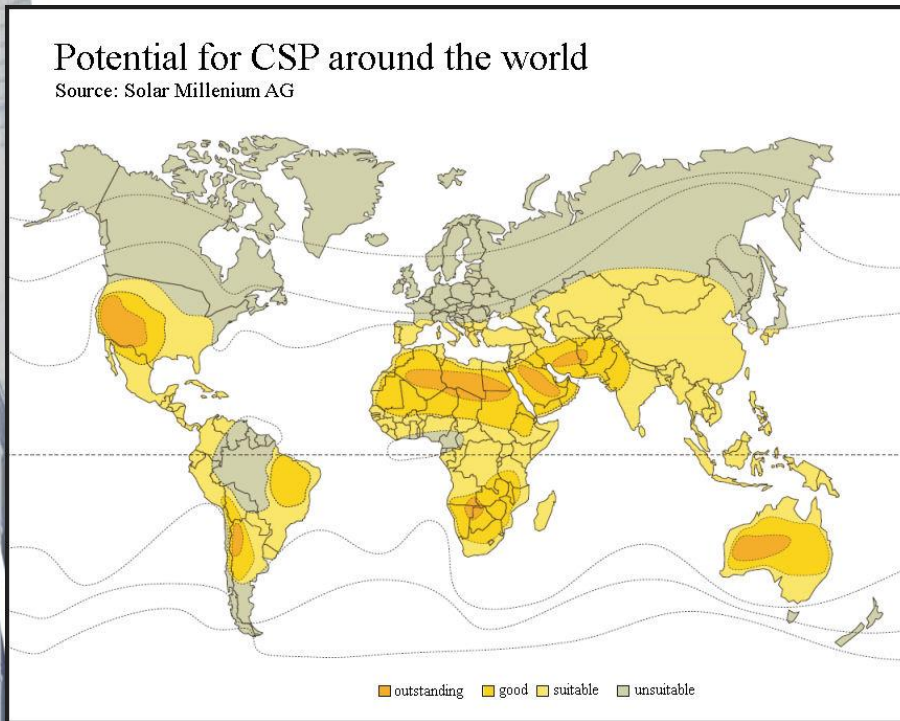


Composites HT
 $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ - graphite



Stockage dans les centrales électrosolaires

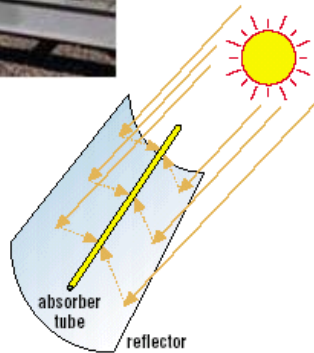
Concentration solaire + cycle thermodynamique



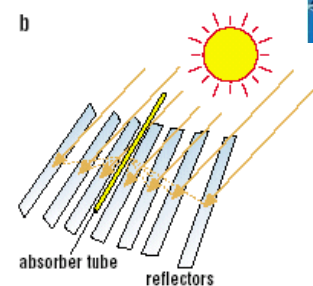
Technologies de concentration



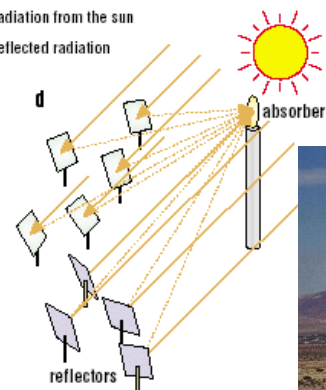
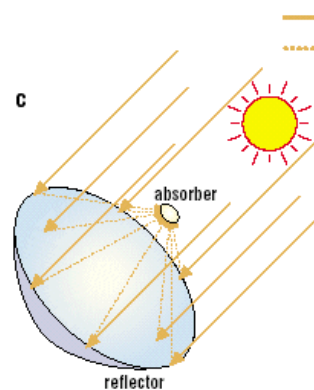
Cylindro-parabolique
(200-400°C)



Linéaire Fresnel
(200-400°C)



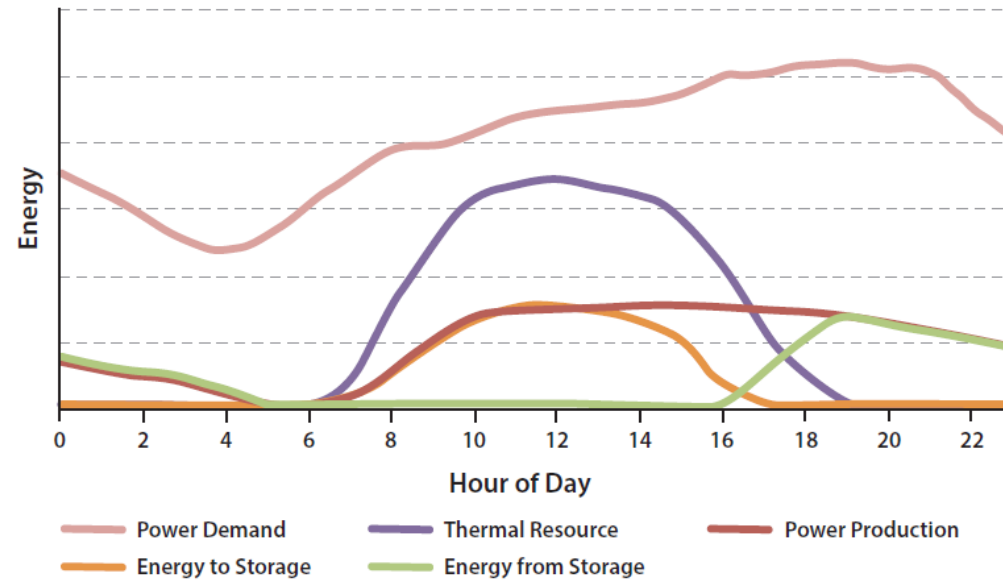
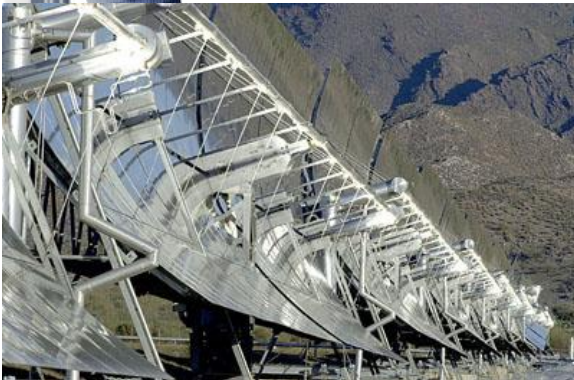
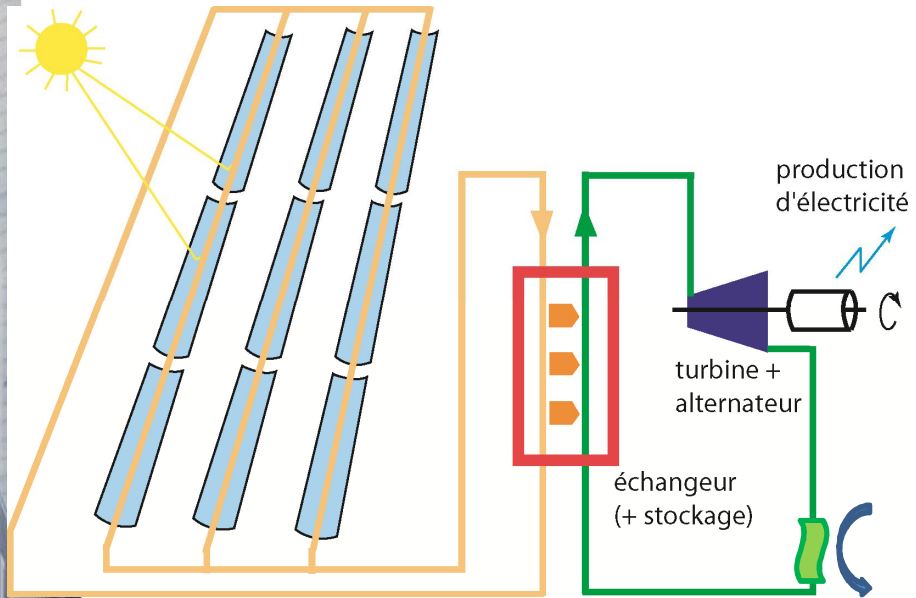
Parabolique
(600-1200°C)



Héliostats et centrale à tour
(400-1000°C)

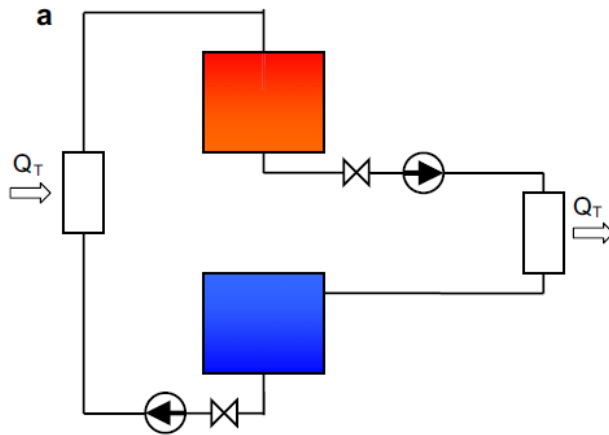


Centrales électrosolaires et stockage

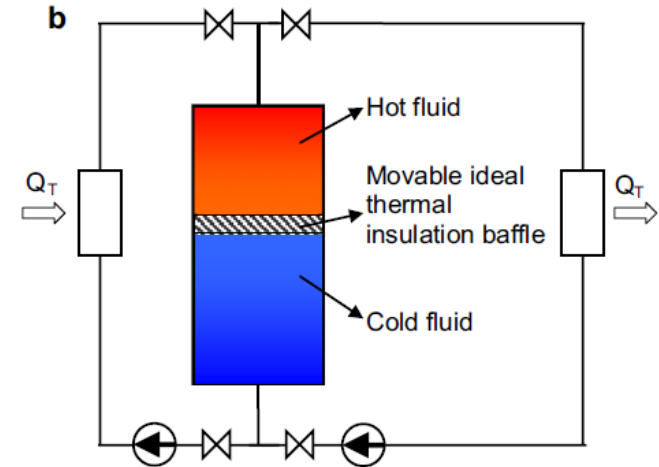


Stockage thermique dans les centrales électrosolaires

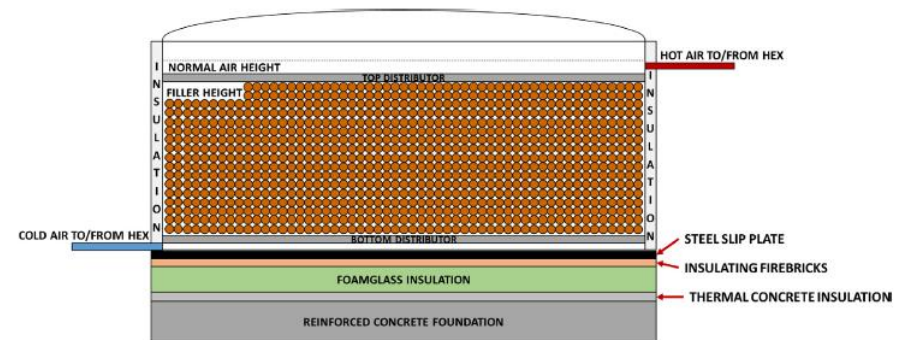
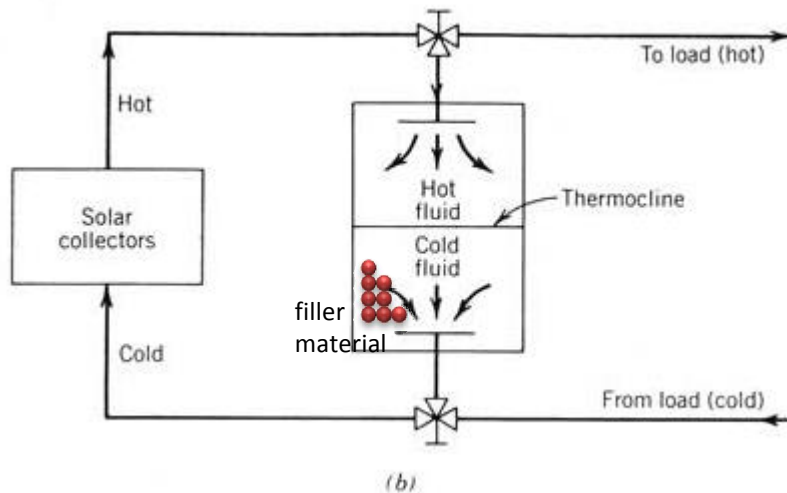
Deux réservoirs



Un seul réservoir



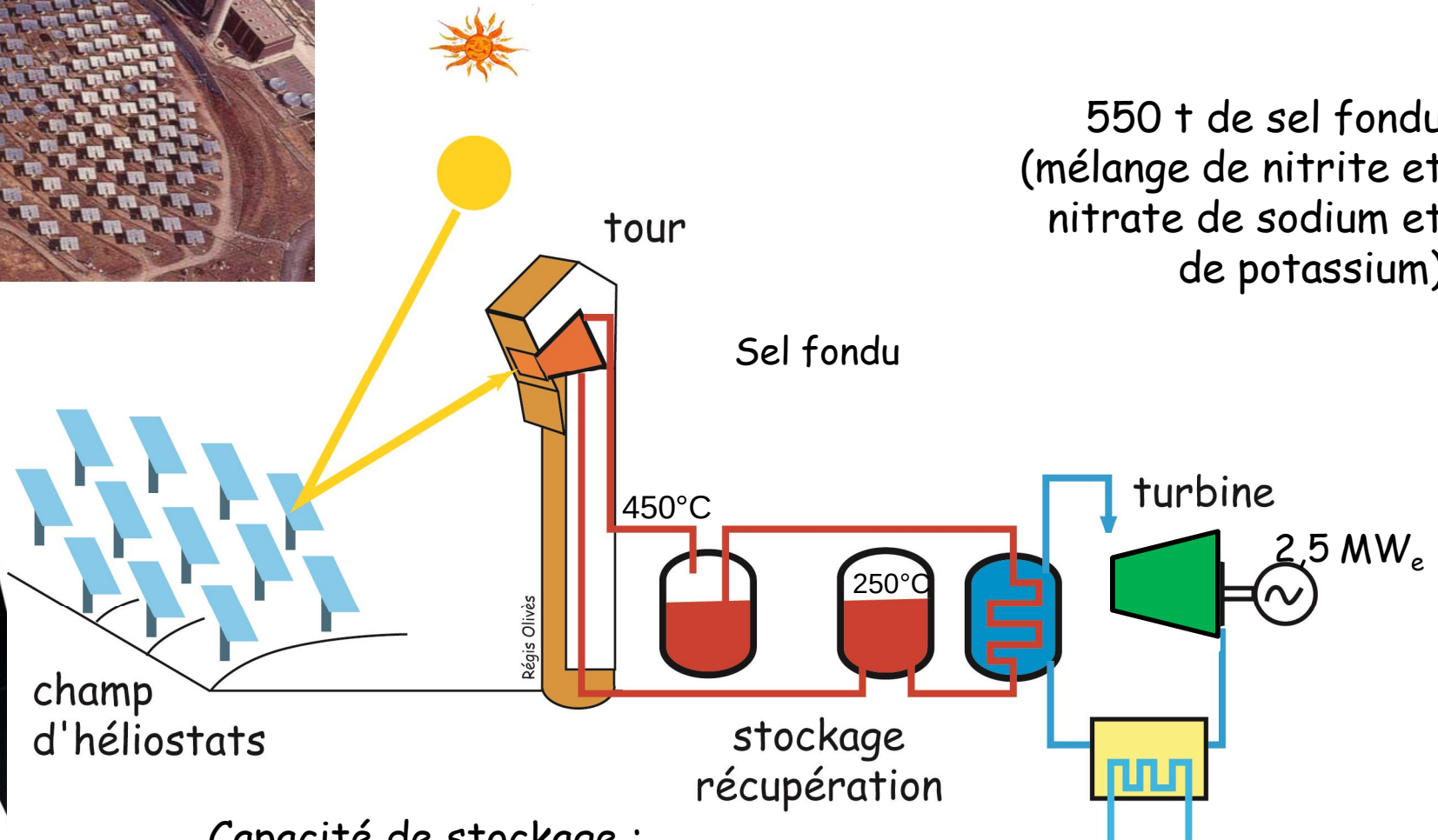
Thermocline



Stockage dans les centrales électrosolaires

Principe de la centrale Thémis (1983-1986)

550 t de sel fondu
(mélange de nitrite et
nitrate de sodium et
de potassium)



Capacité de stockage :
40 000 kWh

ANDASOL (Antin, Cobra, RREEF)

Location Andalusia, Spain

Nominal electrical power

50 MW

Annual equivalent full-load hours

3589 h

Receiver technology

Parabolic trough solar field

Receiver geometry

510 120 m²

Thermal storage technology

Molten salt (28 000 t)

Thermal storage capacity

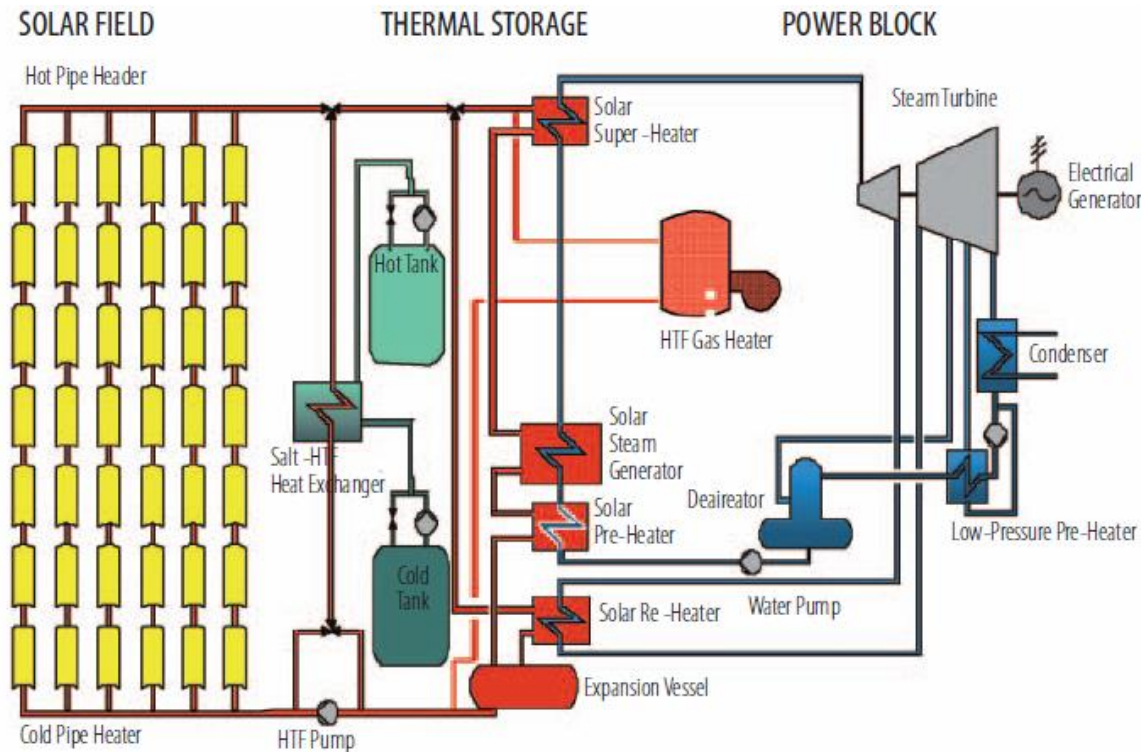
7.5 h reserve

Ground area

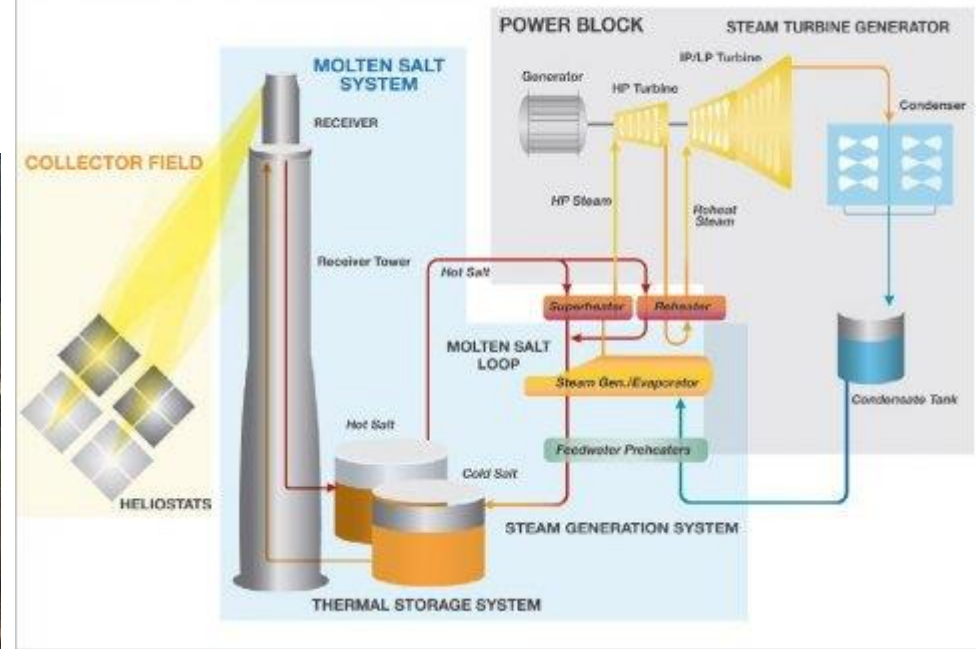
200 ha

Annual electricity production

179 GWh



GEMASOLAR (Torresol Energy)



Location	Sevilla, Spain
Nominal electrical power	19,9 MW
Annual equivalent full-load hours	6400 h
Receiver technology	solar power tower
Receiver geometry	304 750 m ²
Thermal storage technology	Molten salt (8500 t)
Thermal storage capacity	15 h reserve
Ground area	185 ha
Annual electricity production	110 GWh



Stockage thermique

Andasol



Gemasolar



$880 \text{ MWh}_{\text{th}}$
 $28\,000 \text{ t}$
 $\Delta T = 100 \text{ K}$

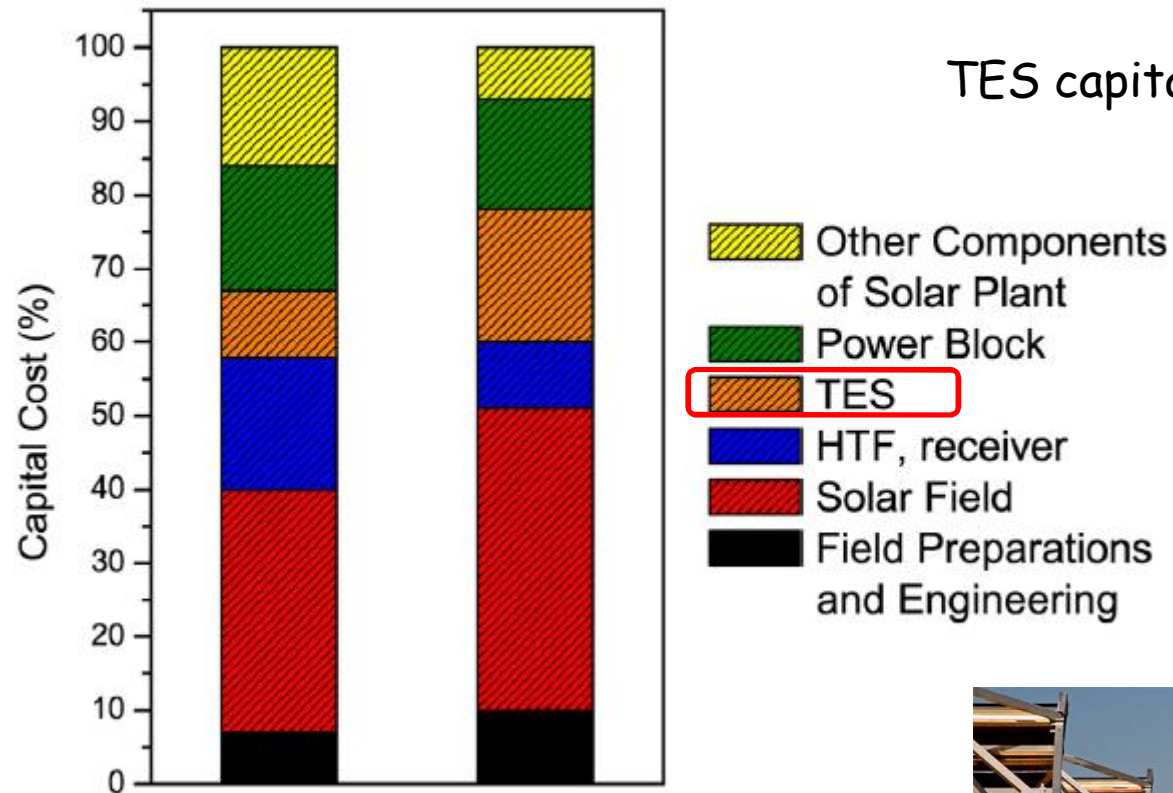
$\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3 : 0,41 \text{ Wh/kg/K}$

$670 \text{ MWh}_{\text{th}}$
 $8\,500 \text{ t}$
 $\Delta T = 275 \text{ K}$



30 à 80 Wh/kg

Répartition des coûts pour une centrale solaire



TES capital cost : 20-50 €/kWh



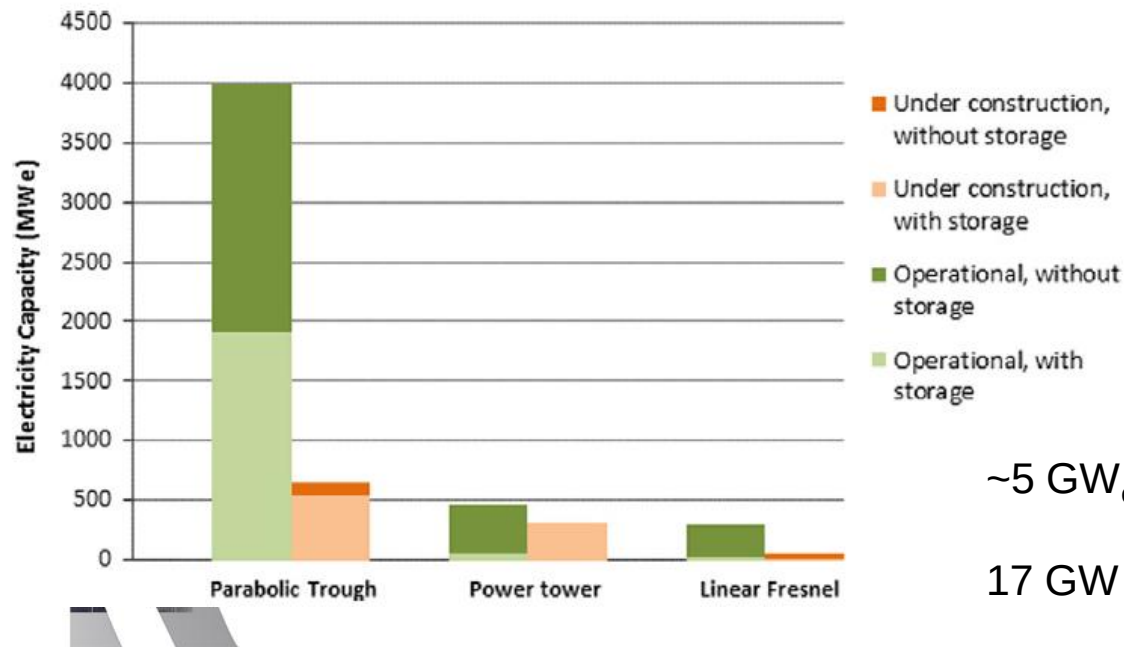
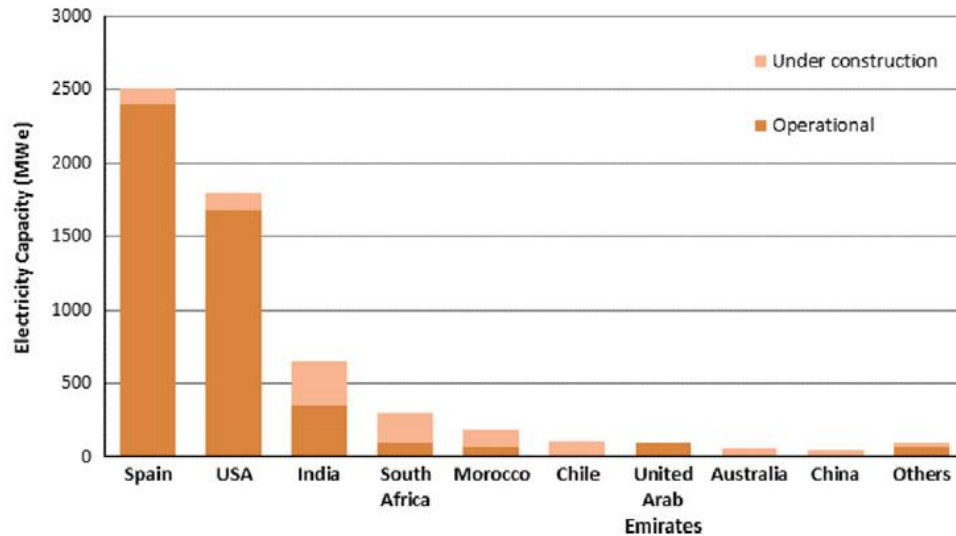
Parabolic trough

Solar tower



Puissance solaire thermodynamique

Décembre 2014



~5 GW_e dont 2 GW_e avec stockage

17 GW en projet

(Liu 2016)

Objectifs AIE en 2030 : 337 GW

1140 TWh/an soit 3,8% de la production mondiale

Conséquences : équivalent de 300 à 750 Andasol/an



besoin (mondial) : 9 à 21 Mt/an de matériaux de stockage



Coût
Disponibilité
Propriétés
Impacts environnementaux

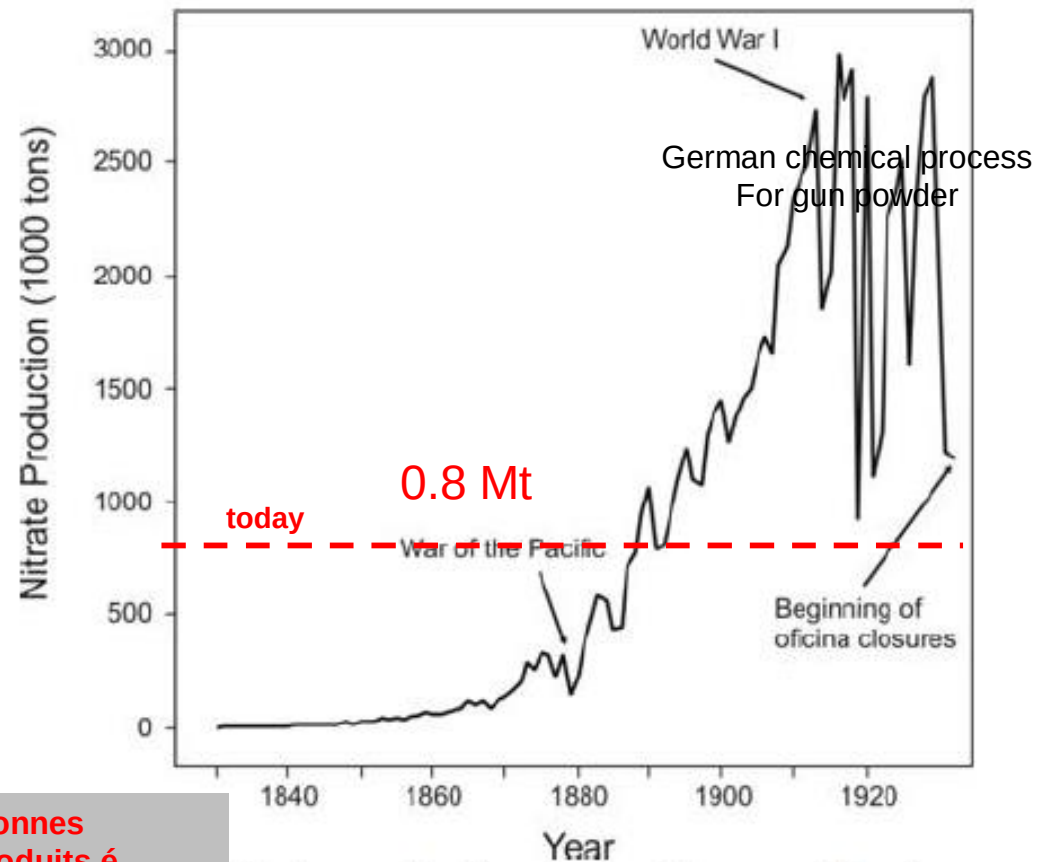
(Projet ReMinER)

Les Nitrates naturels : disponibilités, impacts...

Exploitation de 1812 à WWI puis déclin é
1879 guerre de l'ôr blanc Bolivie Chili Pérou



132 millions tonnes
de déchets produits é
100 usines abandonnées
417 km² de désert exploités



Nitrate production in the Tarapacá Region,

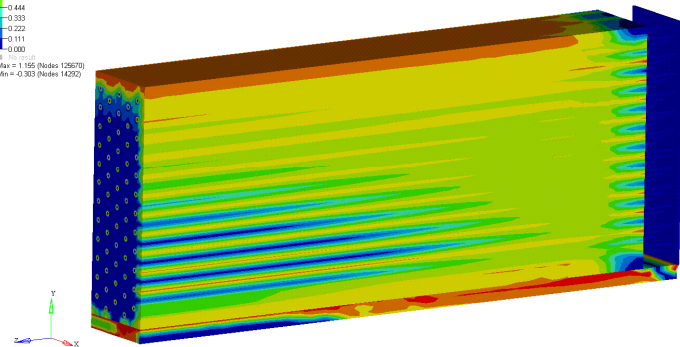


Stockage thermique sur béton (DLR)



Tensile damage
-1.000
-0.989
-0.778
-0.667
-0.556
-0.444
-0.333
-0.222
-0.111
0.000
Max = 1.195 (Nodes 125678)
Min = -0.303 (Nodes 14702)

C:\Dokumente\IFES2008_01_04_00RohrSglas\00Rohr_conc_foam.h3d
Result: C:\Dokumente\IFES2008_01_04_00RohrSglas\00Rohr_conc_foam.h3d
00Rohr_conc_foam - Time=22.00000
Frame 30



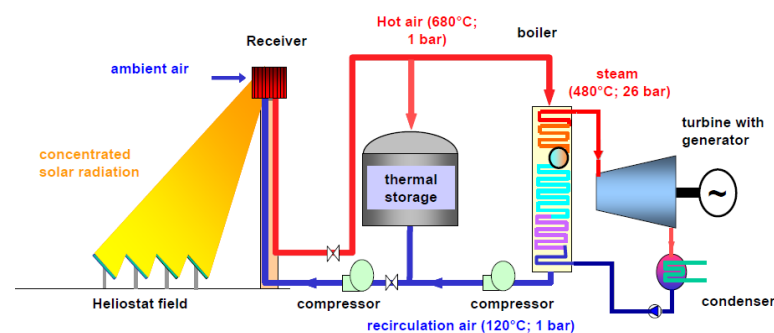
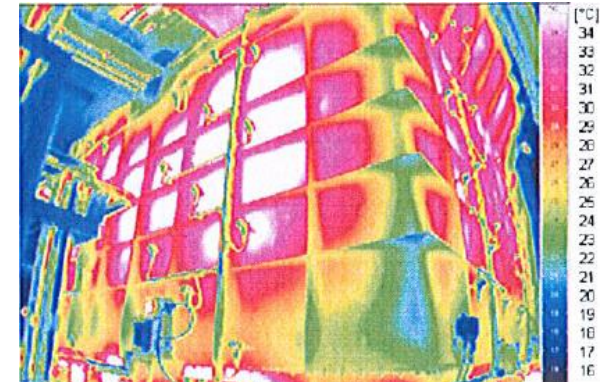
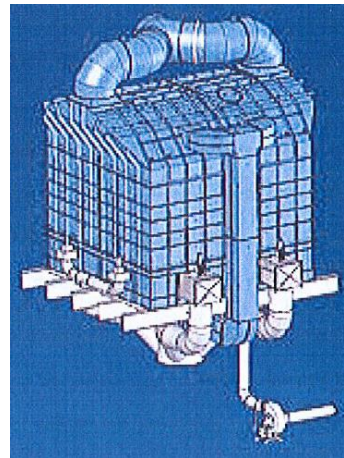
Stockage sur céramiques hautes performances

Centrale à tour pilote de Julich 2009

TES: type Cowper ou RTO (Regenerative Thermal Oxidiser)

Honeycomb: alumine, C130 2700 kg/m³, 880 J/(kg K), 2.1 W/(m K)

Cycles entre 120 et 680°C, 9 MWh, 120 m³.



Approche



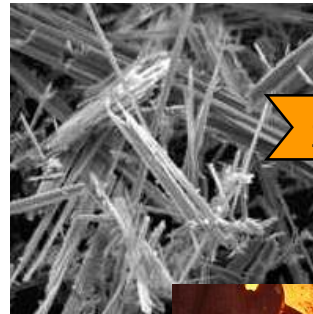
Valorisation de vitrifiats de déchets industriels



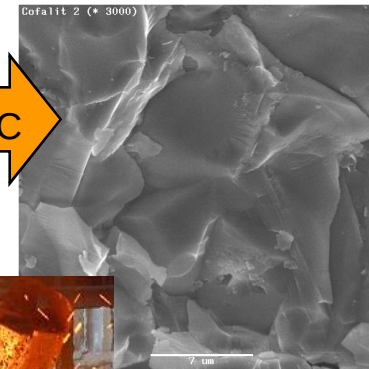
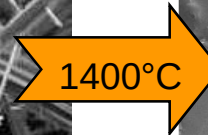
EUROPLASMA
A leading Provider of Clean Technology and Clean Energy Solutions



inertam
GROUPE EUROPLASMA



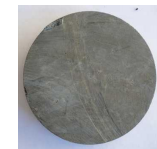
ACW



Possibilité
de mise en forme



verre



céramique

COFALIT



Coût de traitement: 1200 euros/t
payé par le propriétaire

Mise en décharge: 150 à 750 euros/t

Prix de vente en vrac:
8-10 euros/tonne

Gisements

Déchets Amiantés (ACW) :

174 Mt d'amiante utilisées au XX^{ième} siècle dans le monde
250 000 t/an d'ACW produites in France
(Prg ANR Solstock-Sesco)



MSWI FLY ASHES

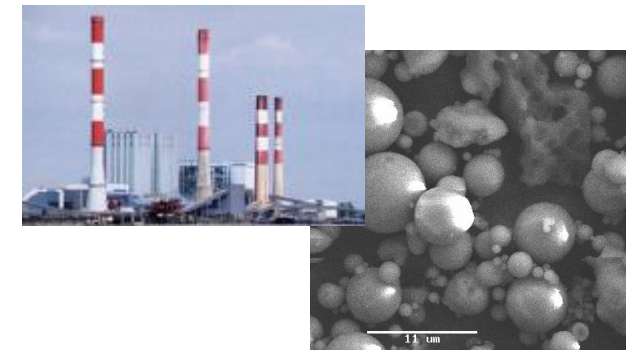
UE(15) : 1,6 Mt/an
UIOM : 3 à 5% des MSW



COAL FLY ASHES

(Prg ANR SACRE)
EDF

750 Mt/an Mondial
UE(15) 42 Mt/an



METALURGIC SLAGS

EDF / ARCELOR MITTAL

> 411 Mt/an Mondial



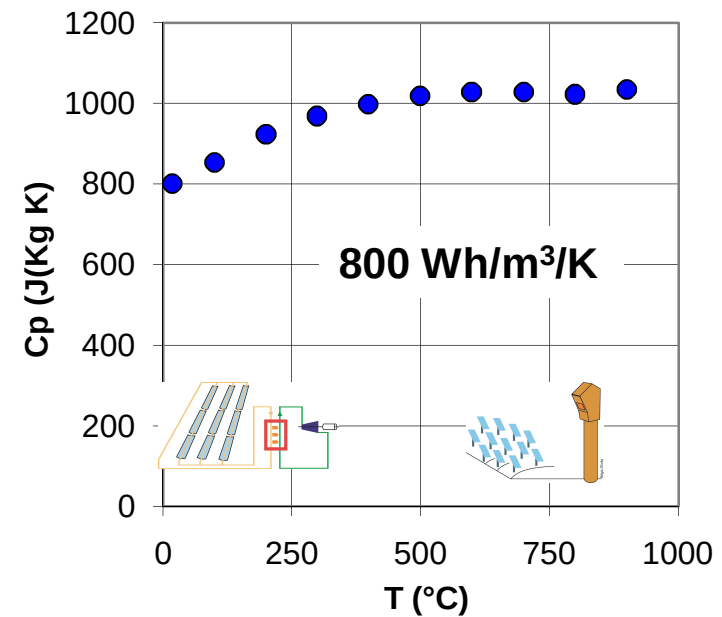
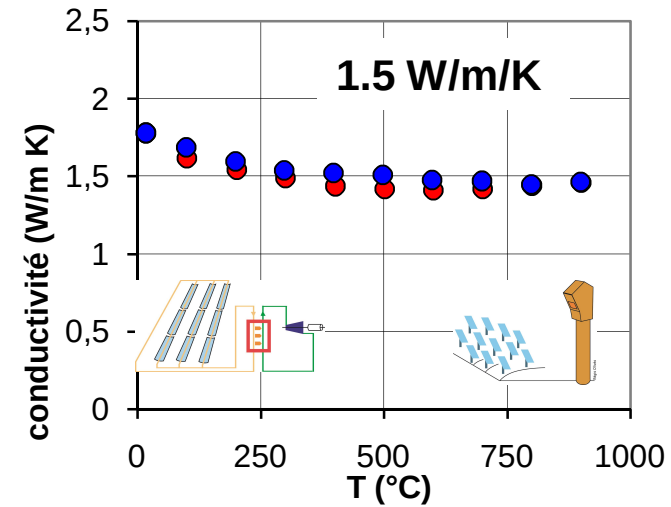
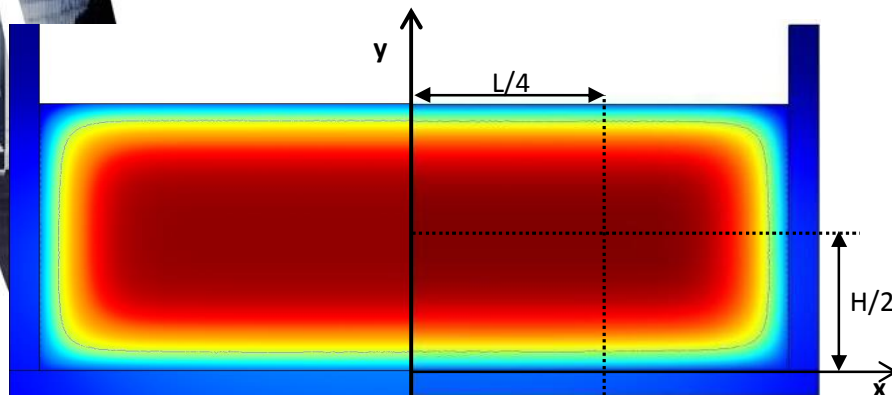
Élaboration et caractérisation de matériaux issus de déchets



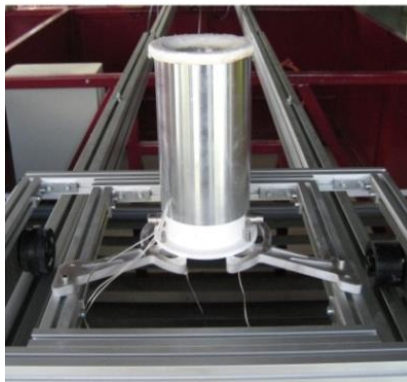
EUROPLASMA
A leading Provider of Clean Technology and Clean Energy Solutions

Cemhti

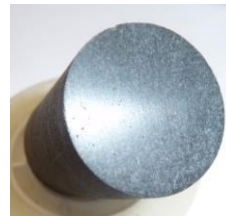
PROMES



Tenue aux chocs thermiques



Tests de cyclages
Fatigue thermoméca.
Mesure de propriétés



d= 25 mm
L= 200 mm

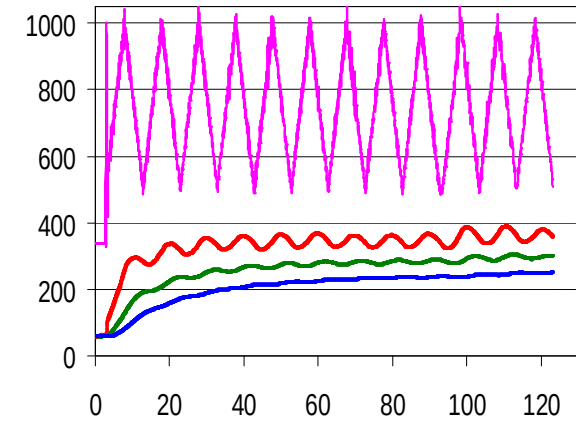
Surface T

10 mm

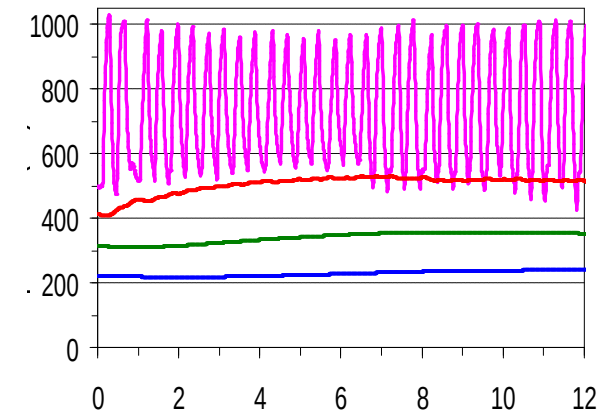
25 mm

40 mm

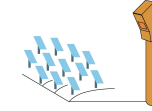
$dT/dt = 100\text{ }^{\circ}\text{C/min}$



$dT/dt = 2500\text{ }^{\circ}\text{C/min}$



Comparaison aux matériaux disponibles

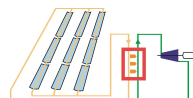


400 ÷ 1000°C

Materials	HT concrete	molten salts	HT Ceramics	ACW ceramics	FAW ceramics
density [kg/m ³]	2750	900 - 2600	3500	3120	2975
C _p [J/(kg×K)]	916	1500	866	800 - 1034	714 - 1122
ρ×C _p [kJ/(m ³ ×K)]	2519	1350 - 3900	3031	2496 - 3226	2124 - 3338
λ [W/(m×K)]	1.0	~ 0.15 - 2.0	1.35	2.1 - 1.4	1.16 - 1.59
coeff of thermal expansion [10 ⁻⁶ /K]	9.3	---	11.8	8.8	8.7
price [euros/tonne]	80	500 - 750	4500 - 9000	8 - 100	10 to 1200



< 400°C



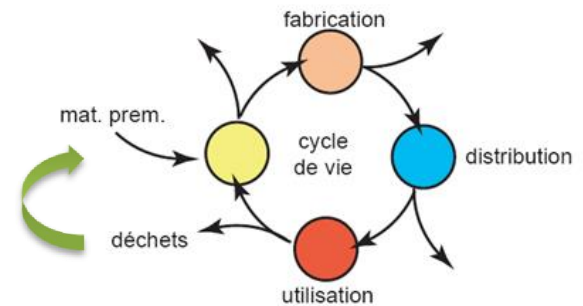
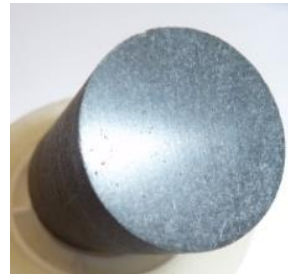
Analyse de cycle de vie - Empreinte écologique

Temps de retour énergétique : < 1 an

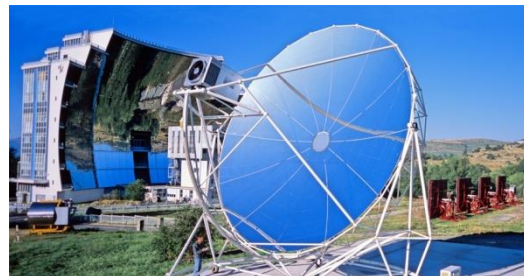
Impact CO_2 : TES < $5gCO_2/kWh$ (centrale : $20-30g CO_2/kWh$)

Valorisation de déchets : utilisation d'une matière première « secondaire »

Éco-toxicité

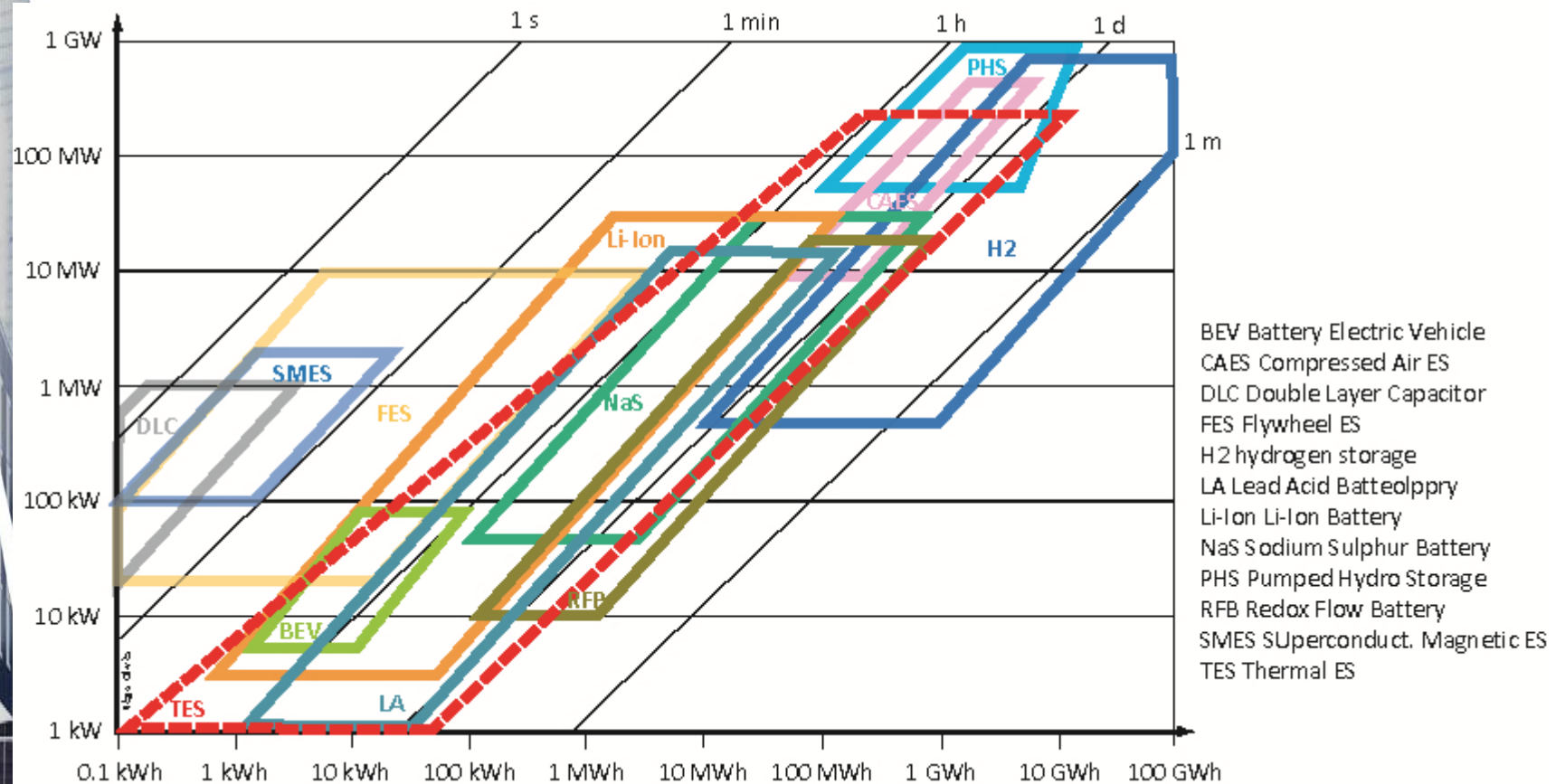


→ Hybridation solaire
(réduction de l'énergie grise)



En guise de conclusion

Stockage thermique / Autres stockages



(d'après Fraunhofer ISE)

En guise de conclusion

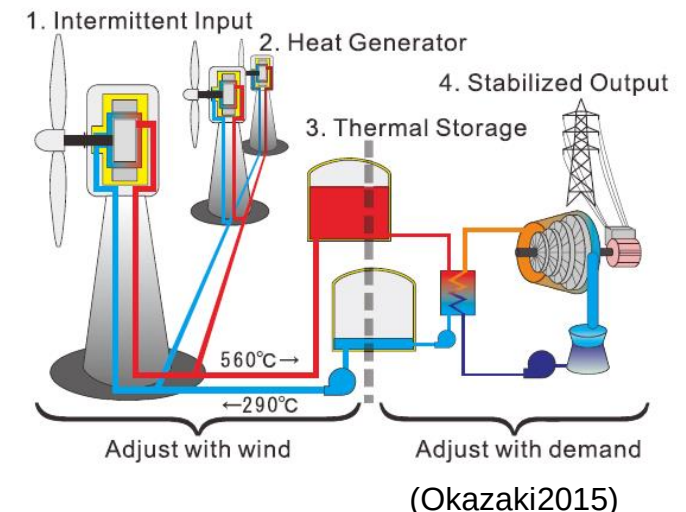
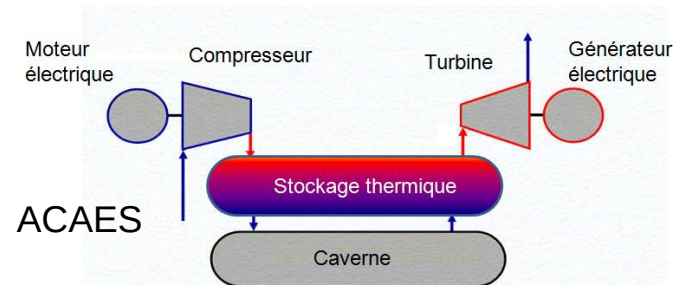
Stockage thermique :
de grandes gammes de puissance et d'énergie

→ Stockage massif à bas coût

Inertage et valorisation de déchets
(gisement, danger, préservation des ressources naturelles)



Développement des EnR
Réduction de l' E_{grise} et GES
Réduction des coûts
Sustainability





Merci

Régis Olivès
Enseignant-chercheur
Directeur de l'école d'ingénieur Sup'EnR
olives@univ-perp.fr

PROMES

UNIVERSITÉ
PERPIGNAN
VIA
DOMITIA

Sup'EnR
École d'ingénieurs