

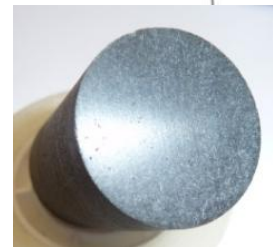
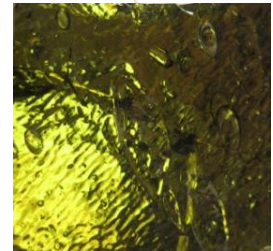
# Stockages pour les procédés solaires à concentration: de l'héritage aux opportunités du XXI<sup>ème</sup> siècle.

Xavier Py, Régis Olives, Vincent Goetz, Quentin Falcoz,  
Antoine Meffre, Amélie Kere, Guilhem Dejean

**PROMES** (PROcédés et Matériaux pour l'Energie Solaire) UPR CNRS 8521,  
UPVD, Université de Perpignan, Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud,  
66100 Perpignan Cedex.

Catherine Bessada , Patrick Echegut, Julien Lambert, Valérie Montouillout, Guy Matzen

**CEMHTI**, Conditions Extrêmes et Matériaux: Haute température et Irradiation  
UPR CNRS 3079 1D avenue de la Recherche Scientifique, 45071 Orléans  
Cedex 2.



Affiliations :

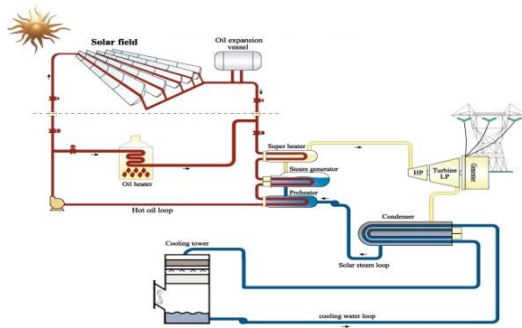
**Laboratoire PROMES CNRS UPR 8521,  
University of Perpignan**

Consacré aux Procédés Solaires à Concentration et Matériaux associés,  
150 personnes sur deux sites (Odeillo – Perpignan Tecnosud)

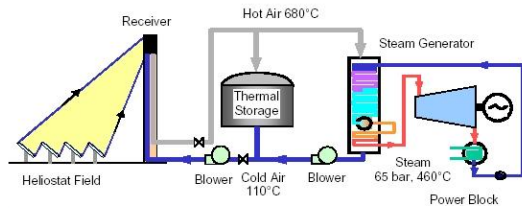




## Centrales électrosolaires thermodynamiques (CSP)



Sun x 70 - 100  
250 - 400°C 50 MWe



Sun x 200 - 1000  
250 - 1000°C 10-20 MWe



**ANDASOL**  
Sevilla Spain  
2006  
50 MWe  
7h.5 TES  
28 000 t  
NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>

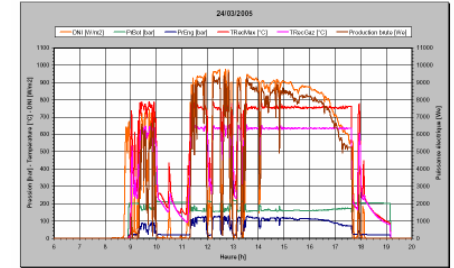
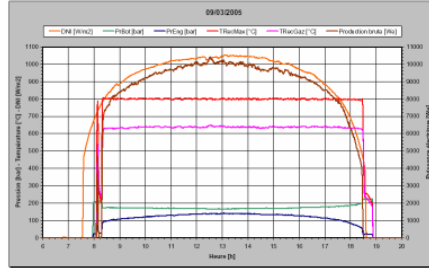


**GEMASOLAR**  
Granada Spain  
2011  
20 MWe  
15h TES  
NaNO<sub>3</sub>/KNO<sub>3</sub>

# Contexte du sujet :

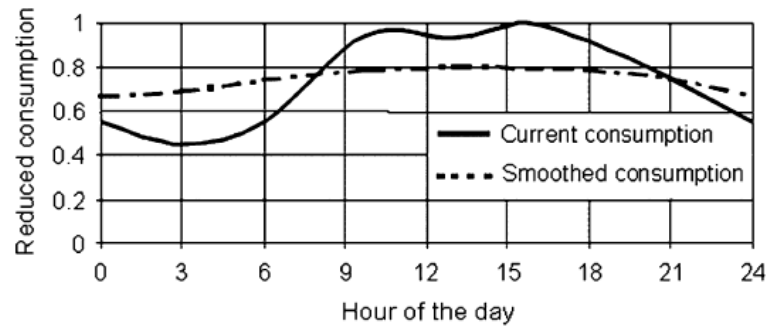
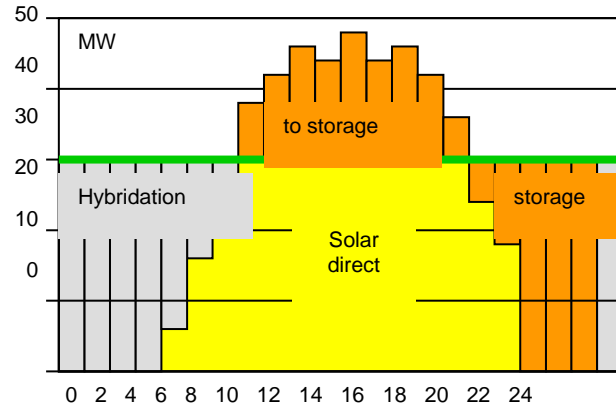
## Stockage de protection :

intermittences



## Stockages de production :

variations,  
déphasage



### Targasonne France

1982-1985, 2.5 MWe, 560°C

550 tonnes sel

HTF + stockage en sel

40 MWh 5h d'ensoleillement

$$Q = m C_p \Delta T$$

Te 250°C

Ts 450°C

40% NaNO<sub>2</sub>

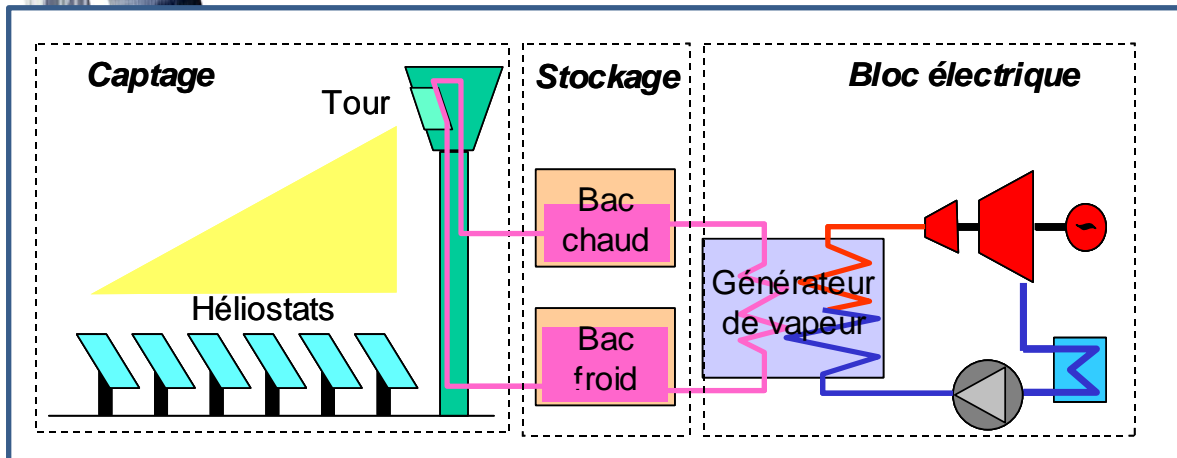
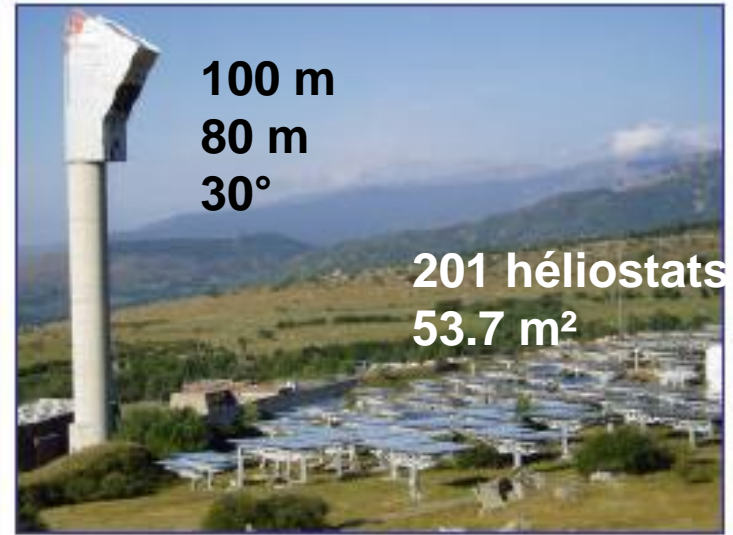
7% NaNO<sub>3</sub>

53% KNO<sub>3</sub>

T<sub>m</sub> 142°C

Cp 1300 J/(kg K)

ρ 1900 kg m<sup>-3</sup>





## SOLAR ONE Barstow California

14 MWe - 3h stockage

1982-1985

production directe de vapeur

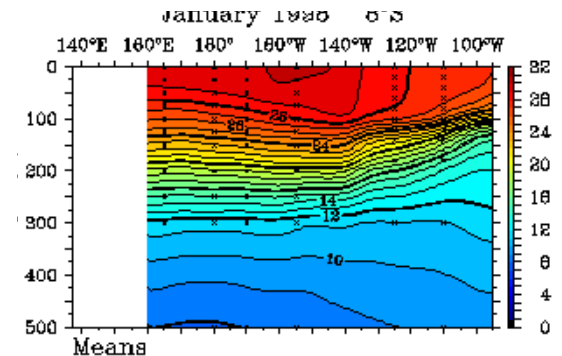
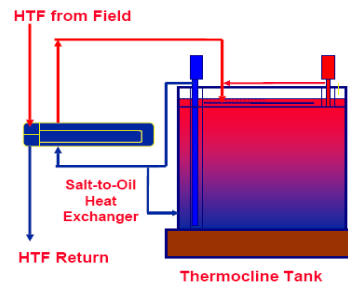
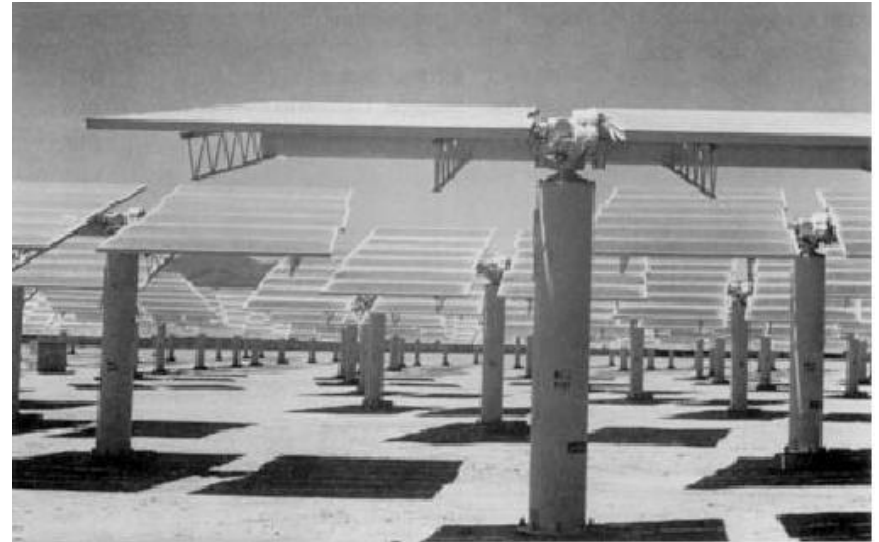
### Stockage :

échangeur de chaleur vapeur/huile

Dans le volume de stockage thermocline:

huile 4230 m<sup>3</sup>  
4120 tonnes particules granite  
2060 tonne sable  
244°C-304°C

Matériau naturel  
type roche



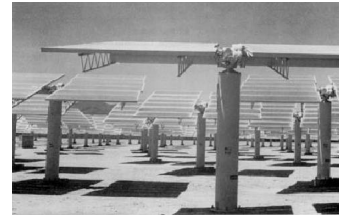
52 kWh/m<sup>3</sup> ( $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ )  
20 – 30 €/kWh

## SOLAR ONE Barstow California

10 MWe - 1982-1988

Centrale à Tour / Héliostats

DSG: Generation Directe de Vapeur

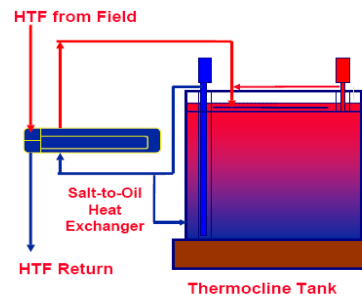


(1) Échangeur chaleur vapeur/huile

(2) Thermocline une cuve avec garnissage

TES : sensible  
3h, 244°C/304°C

**Coût huile de synthèse**  
**Inflamabilité**  
**Crackage catalysé par le garnissage**



huile 4230 m<sup>3</sup>  
4120 t particules granite  
2060 t sable  
20% porosité

## SEGS I Daggett California

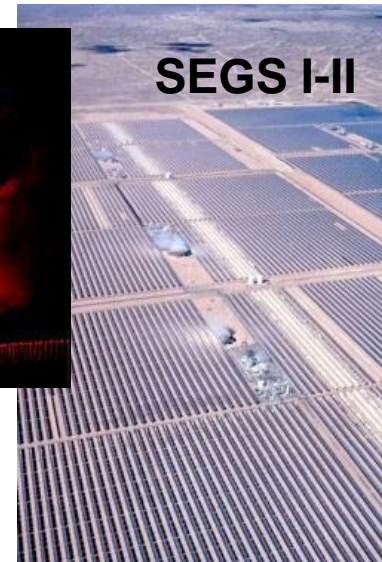
14 MWe – 1985

Cylindros CSP huile minérale Caloria

TES : 3h sensible, deux cuves en huile  
240°C 4160 m<sup>3</sup>/307°C 4540 m<sup>3</sup>



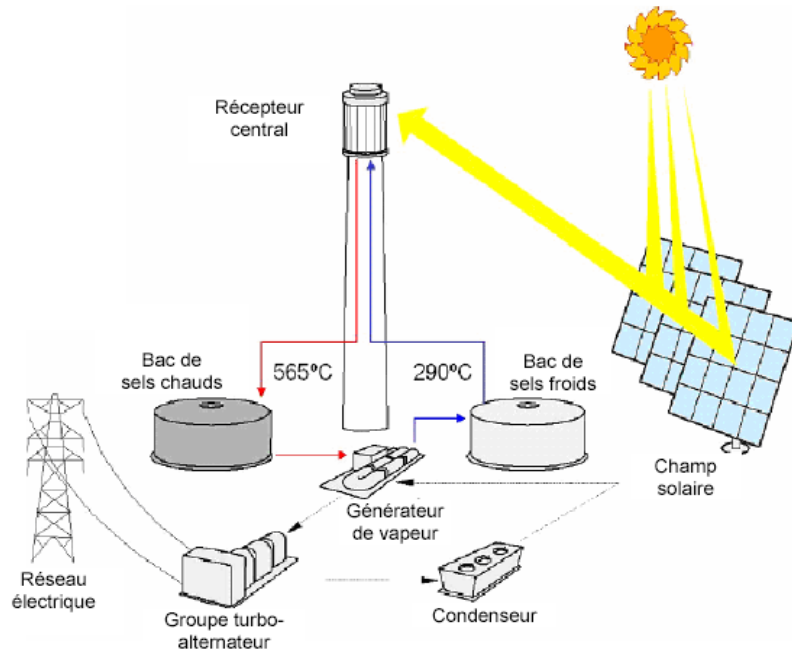
SEGS I-II



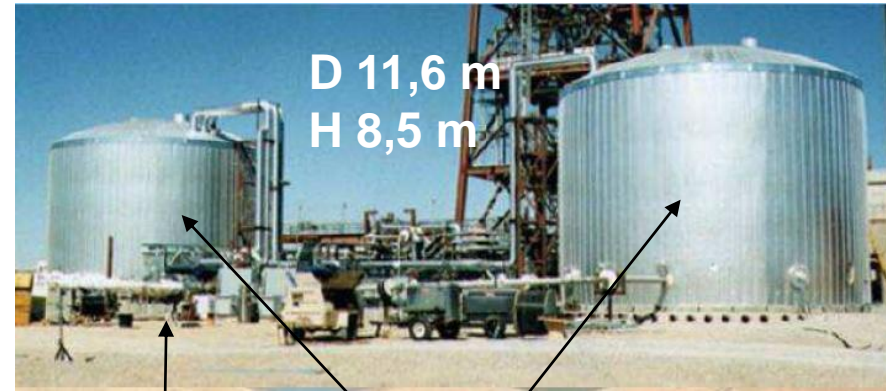
**En 1999 incendie et explosion ... fin du TES sur huile**

### SOLAR TWO Barstow California

1990-2000 12,4 MWe 3h stockage  
passage au sel fondu  
pour augmenter T



récepteur : 88%  
stockage: 97%  
cycle vapeur: 34%  
rendement global max : 13,5%



D 11,6 m  
H 8,5 m

$V_{\text{tot}} = 1731.5 \text{ m}^3$   
capacity: 110 MWht  
1400 tonnes sel

fondations à refroidissement convection naturelle pour éviter surchauffe et déshydratation du sol



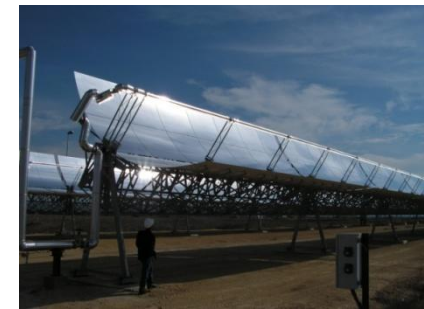
Solar Two (10 MWe, USA)



Historique :

## ANDASOL Granada Spain 2009

50 MWe - 7.5 h stockage (28 000 t  $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$ )  
625 collecteurs (12m long, 6m ouverture) HTF huile solaire  
260 millions euros  
1 950 000 m<sup>2</sup>  
152 000 tonnes  $\text{CO}_2$ /an

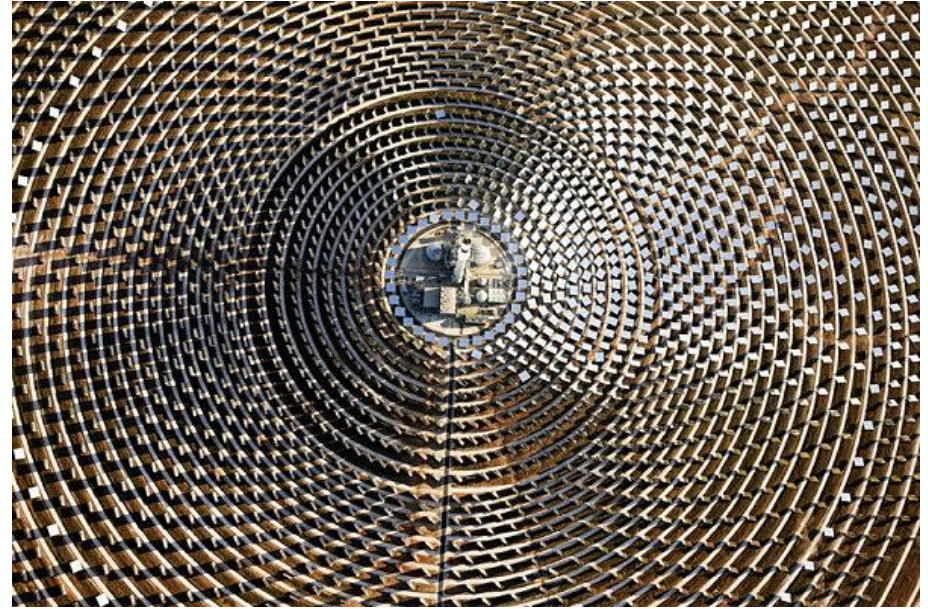




19.9 Mwe, 171 Millions €, Tour 140 m  
Technologie sels fondus ( $T_{\max}$  565°C), 15h TES



Toute première CSP industrielle  
qui fonctionne 24 h/jour  
avec la techno Themis !!!



185 hectares, 2650 Heliostats de 110 m<sup>2</sup>  
30.000 t/an de reduction CO<sub>2</sub>

**Prochainement: Crescent Dune USA 110 MWe**

SEGS USA



1990: 354 MWe

11%  
17c €/kWh

1980

1985

1990

1995

2000

Solar One USA



1982 - 1988  
10 MWe

Solar Two USA



1996 - 1999  
12.4 MWe

13.5%  
15c €/kWh

Themis France



1982 - 1986  
2.5 MWe

17%  
15c €/kWh

Puis : rien de nouveau de 1986 à 2006  
20 ans de sommeil industriel...



Contexte du sujet :

# Histoire du CSP: seconde période, le développement industriel



**Nevada Solar One** 64 MWe  
2007

**Andasol 1** 50 MWe  
2009

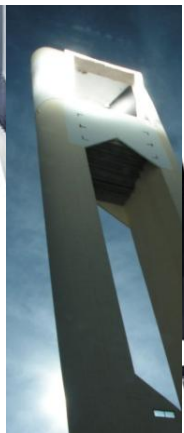
**Linear Fresnel ... ???**  
**Organic cycles ... ???**



**Andasol # - Extresol #**  
50 MWe

2006 2010 2025 2050

**PS10 Abengoa**  
11 MWe  
2006



**PS20 Abengoa**  
20 MWe  
2009

700 Mwe

**Gemasolar Spain**  
20 MWe  
2012



250 GWe



630 GWe  
**(IEA)**

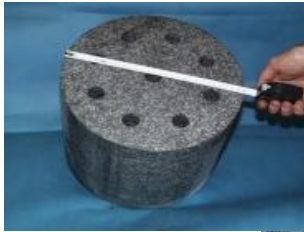
400 Andasol Plants chaque année !!!  
soit 70 fois la production mondiale de Nitrates !

Approche innovante développée :

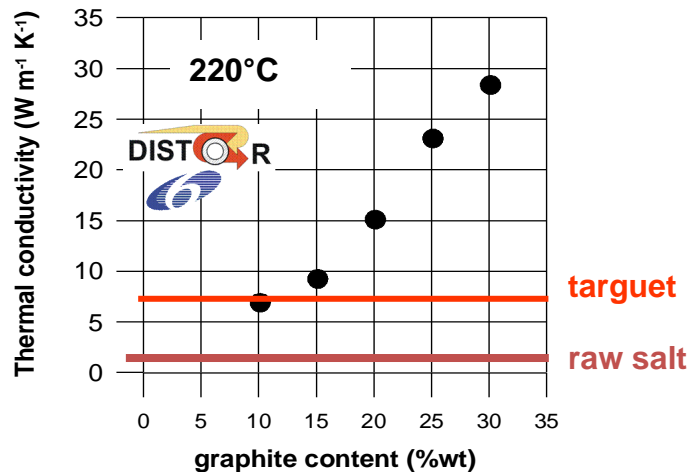
Approche Allemande 1 : DLR







$\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$



14 t  $\text{NaNO}_3$  ( $305^\circ\text{C}$ )

700 kWh

DSG Endesa Carboneras Spain

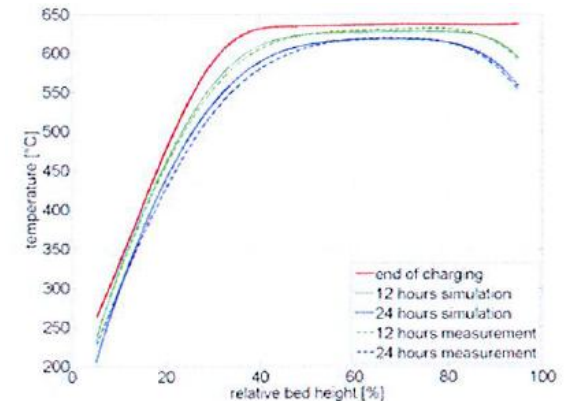
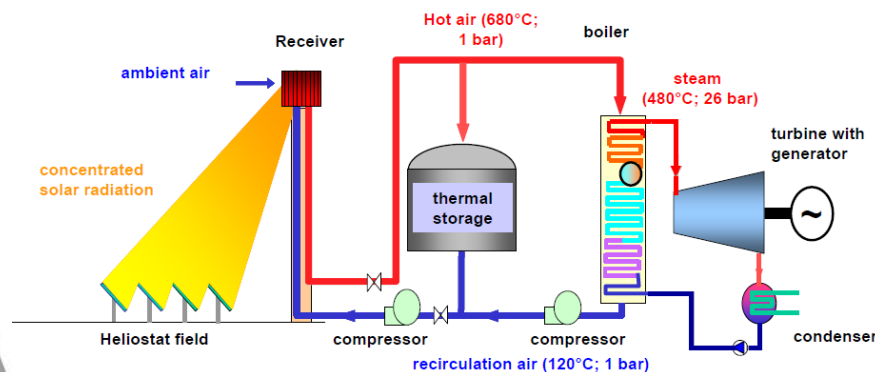
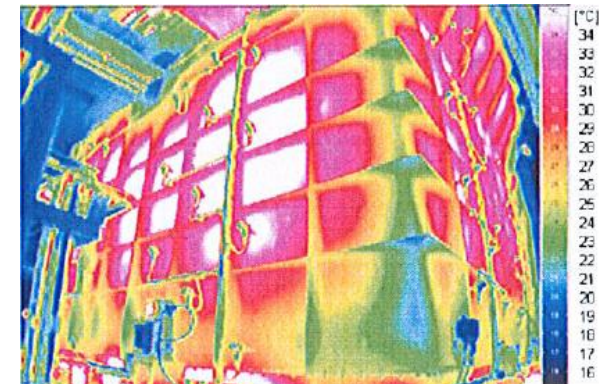
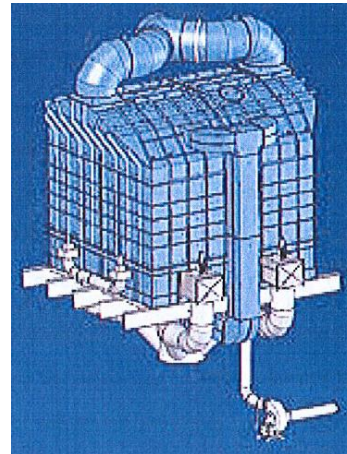


Centrale à tour pilote 2009

TES: type Cowper ou RTO (Regenerative Thermal Oxidiser)

Honeycomb: alumine, C130 2700 kg/m<sup>3</sup>, 880 J/(kg K), 2.1 W/(m K)

Cycles entre 120 et 680°C, 9 MWh, 120 m<sup>3</sup>.



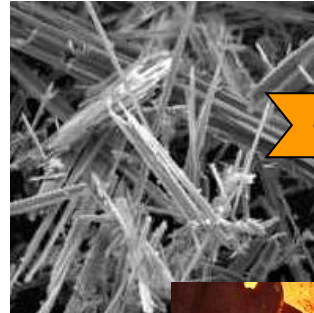
## Valorisation de vitrifiats de déchets industriels comme TESM



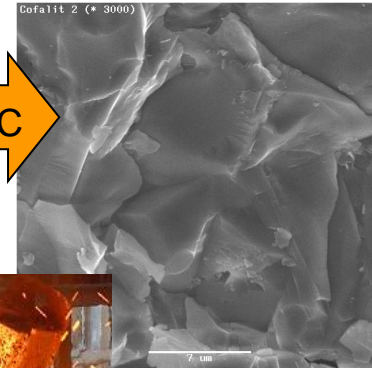
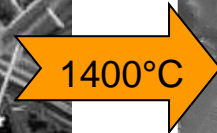
**EUROPLASMA**  
A leading Provider of Clean Technology and Clean Energy Solutions



**inertam**  
GRUPE EUROPLASMA



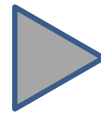
ACW



verre



céramique



Possibilité  
de mise en forme



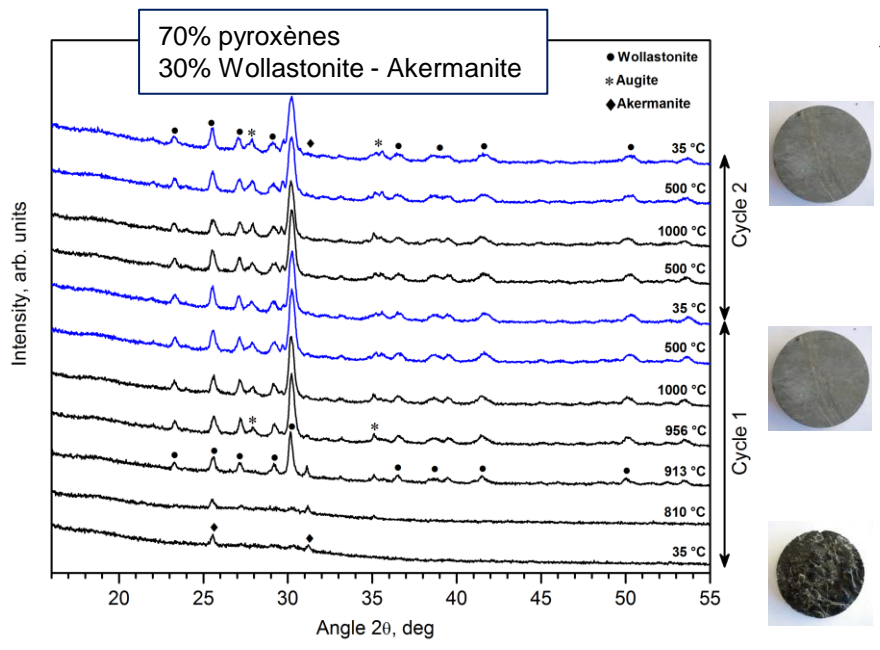
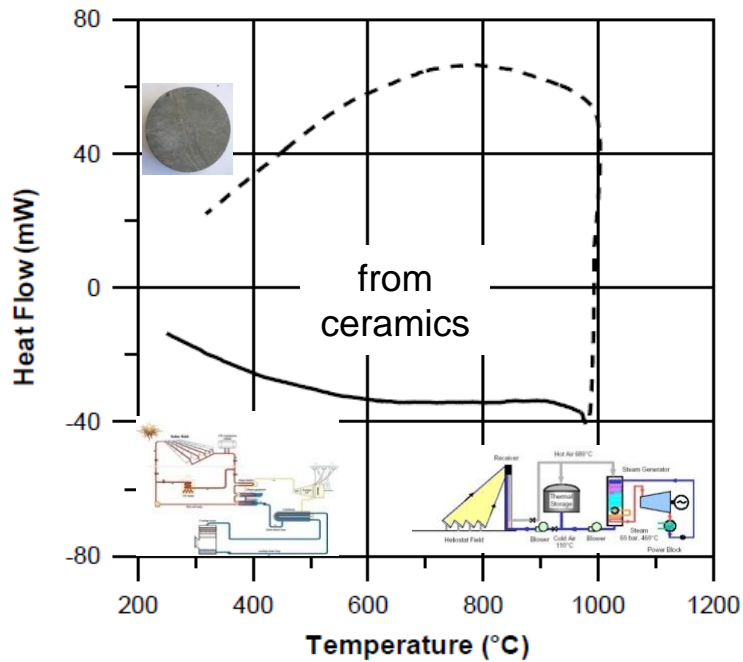
Coût de traitement: 1200 euros/t  
payé par le propriétaire

Mise en décharge: 150 à 750 euros/t

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

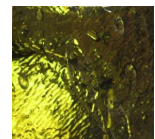
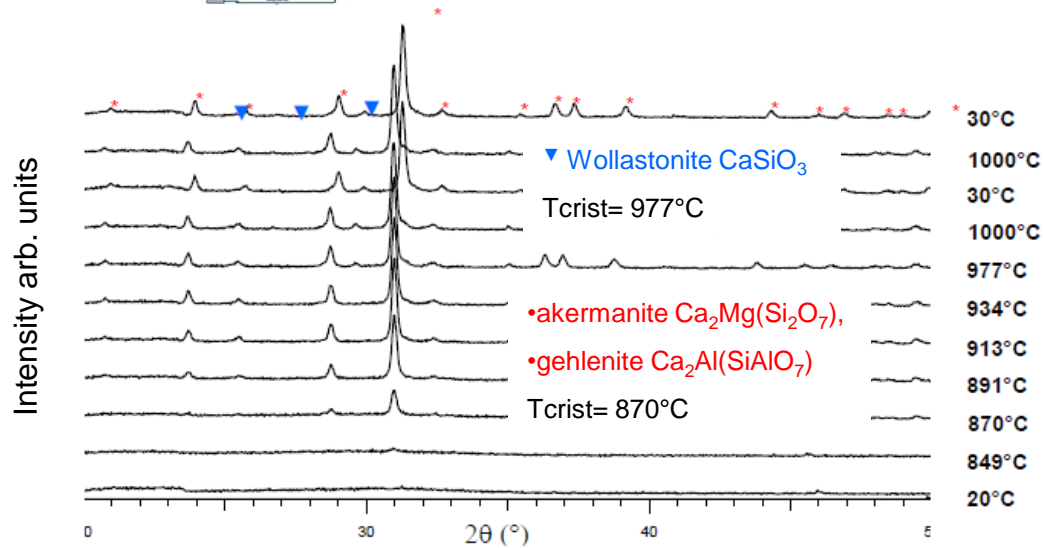
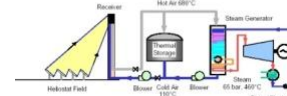
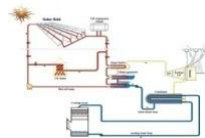
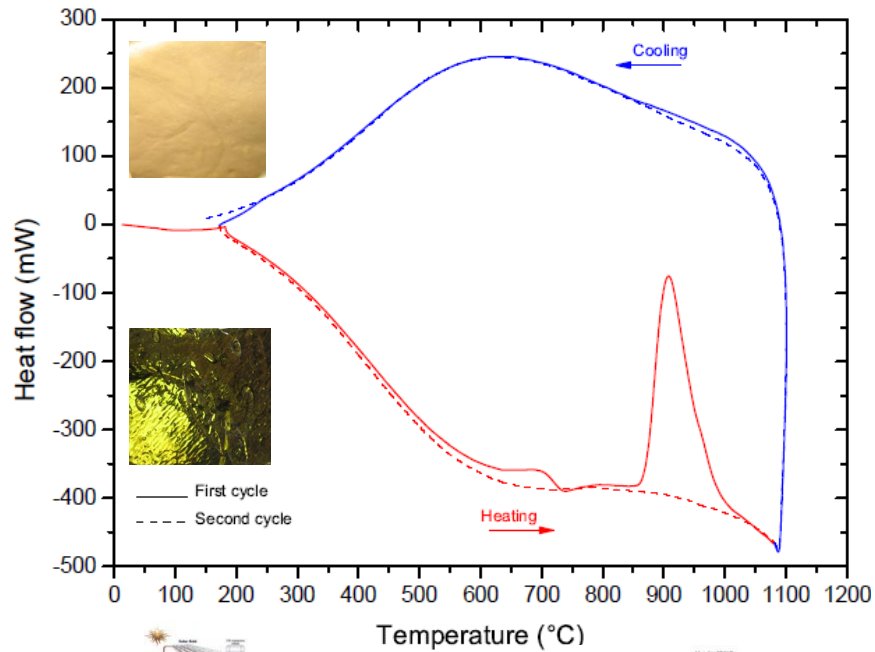


# VITRIFIATS DE DECHETS AMIANTES



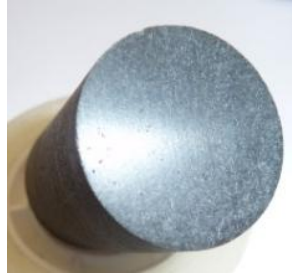


# VITRIFIATS DE CENDRES VOLANTES MSWI



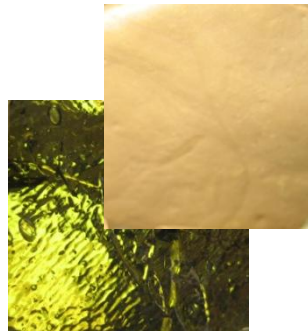
# CAPACITES DE STOCKAGE

$$\rho = 3100 \text{ kg/m}^3$$

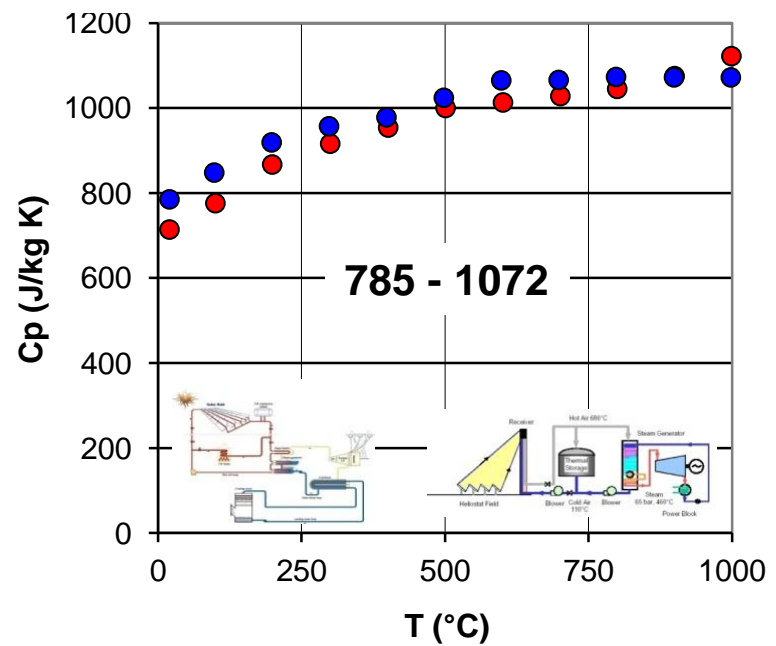
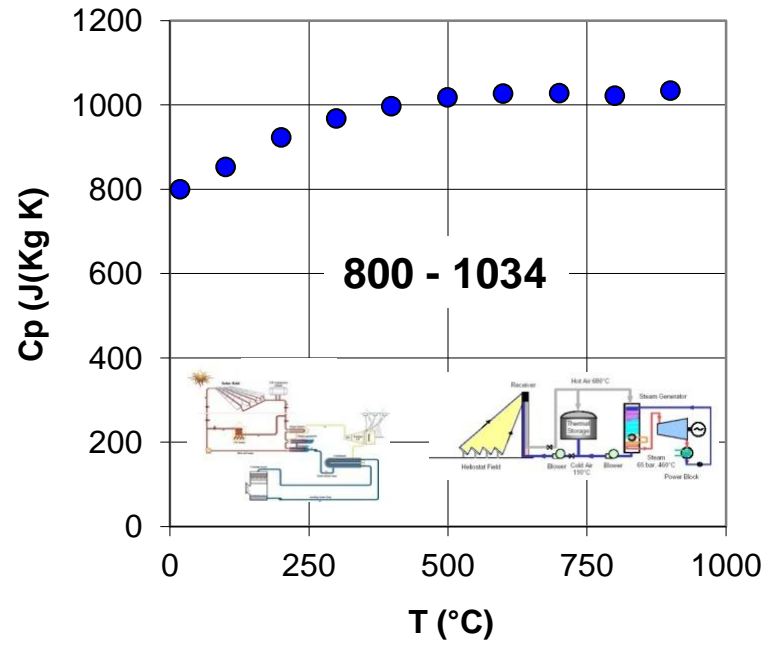


ACW ceramics

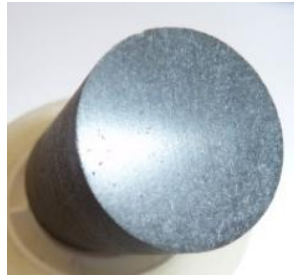
$$\rho = 2975 \text{ kg/m}^3$$



FAW ceramics



# CONDUCTIVITIES THERMIQUES



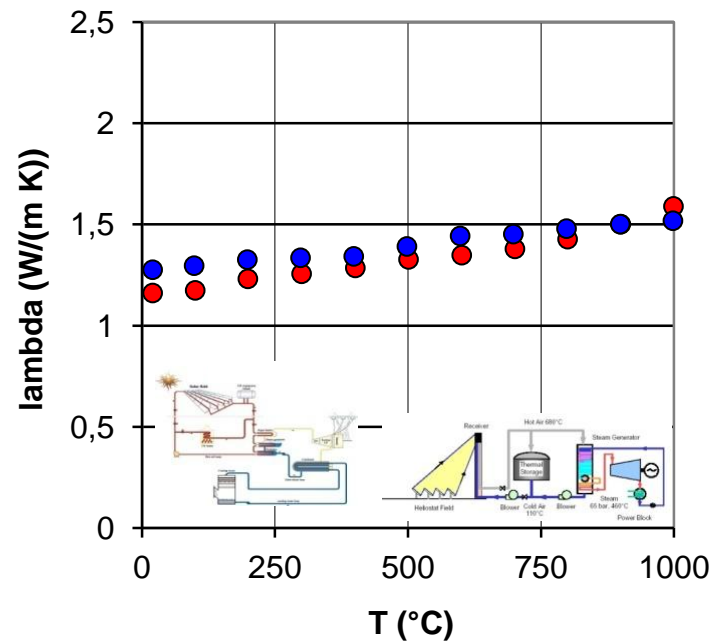
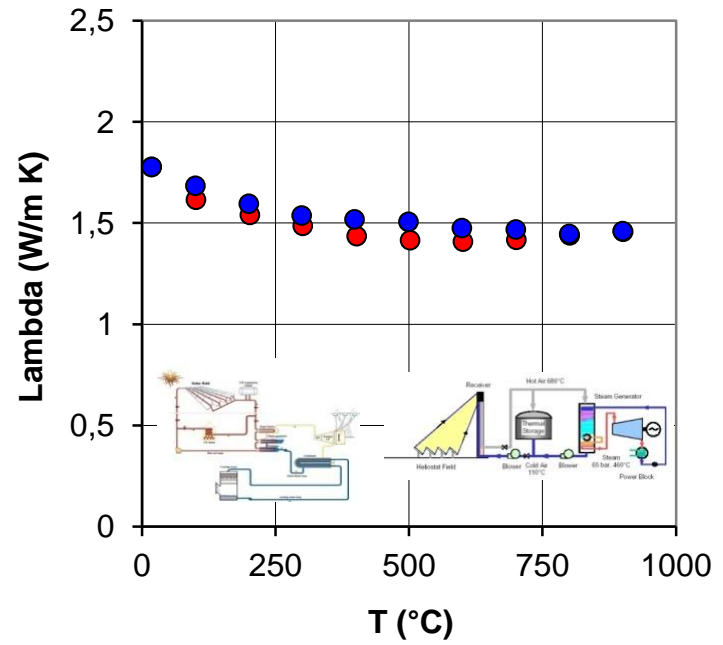
ACW ceramics

$$\lambda \approx 1.5 \text{ W/(m K)}$$



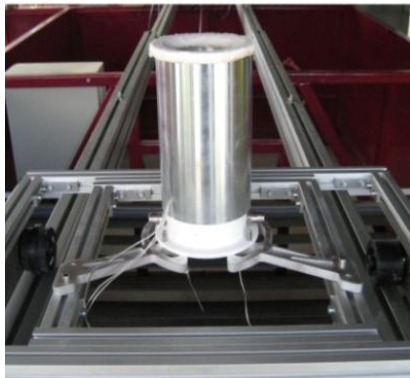
FAW ceramics

NETZSCH model DSC 404 C *Pegasus*

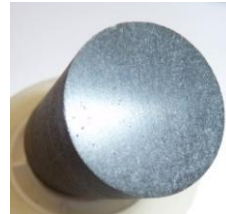




# Caractère réfractaire :



Tests de cyclages  
Fatigue thermoméca  
Mesure  $\alpha$



d= 25 mm  
L= 200 mm

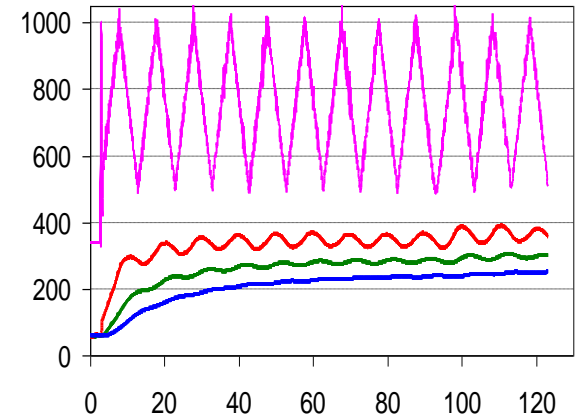
Surface T

10 mm

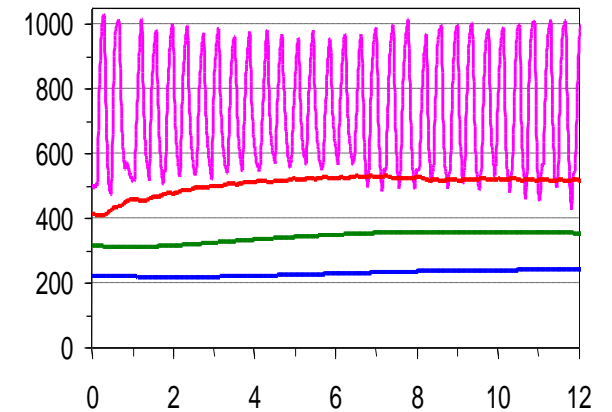
25 mm

40 mm

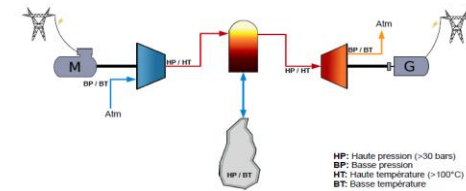
dT/dt = 100 °C/min



dT/dt = 2500 °C/min



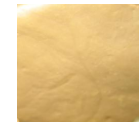
# Comparaison aux matériaux disponibles :



650 – 1000°C

Materials	HT concrete	molten salts	HT Ceramics	ACW ceramics	FAW ceramics
density [kg/m <sup>3</sup> ]	2750	900 - 2600	3500	3120	2975
C <sub>p</sub> [J/(kg×K)]	916	1500	866	800 - 1034	714 - 1122
ρ×C <sub>p</sub> [kJ/(m <sup>3</sup> ×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 <sup>-6</sup> /K]	9.3	---	11.8	8.8	8.7
price [euros/tonne]	80	500 - 750	4500 - 9000	8 - 10	10 to 1200

< 600°C



Mises en forme :

Prg: SESCO ANR StockE  
PROMES, CEMHTI, EUROPLASMA SILIMELT

Echelle  
Laboratoire :



Echelle  
Industrielle :

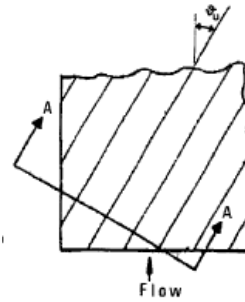
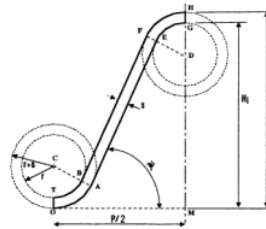
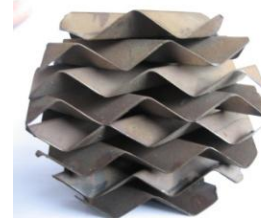
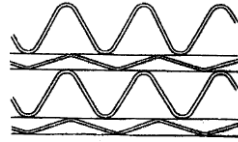


**EUROPLASMA**  
Leading Provider of Clean Technology and Clean Energy Solutions





## Prochaine étape, prototypages :



**Fluides** : huiles, sels fondus, vapeur, air  
**Températures** : de 200 à 1000°C  
**Priorités**: CSP, CAES

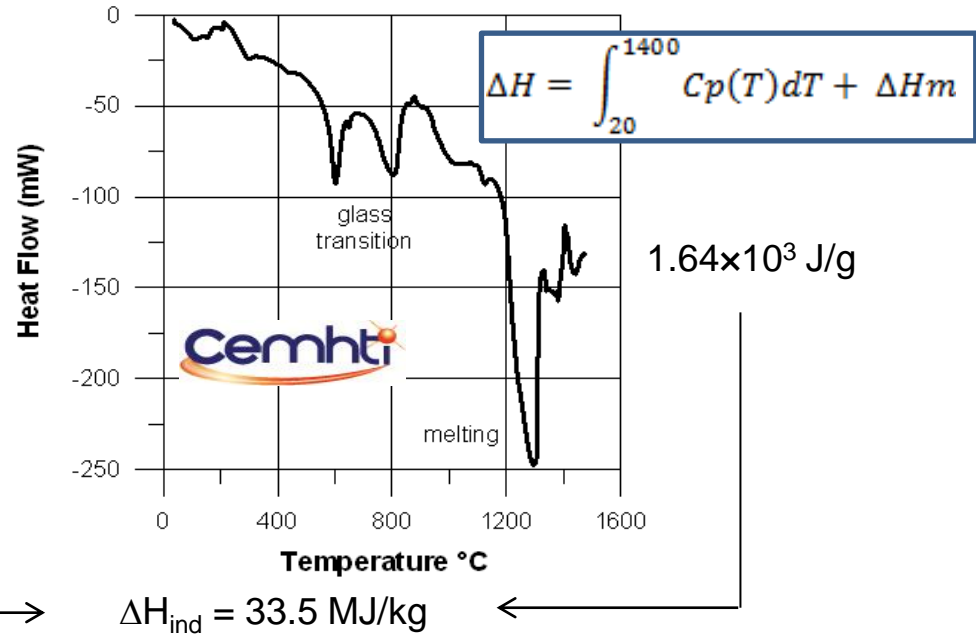


# Temps de retour énergétique :

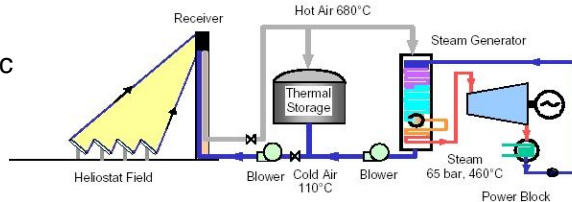
$E_{\text{élec}}$



Rendement masse: 14-26%  
Efficacité E : 35-56%



$E_{\text{élec}}$



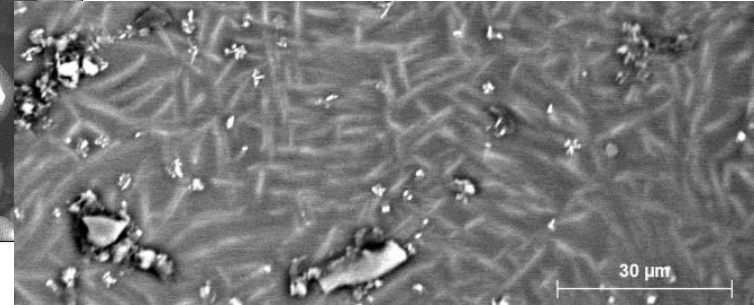
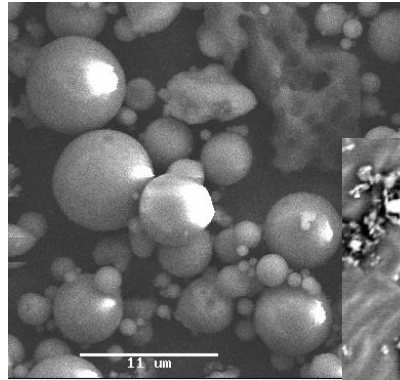
Rendement PB:  
33%

**Retour énergétique :  
2 mois à 2 ans**

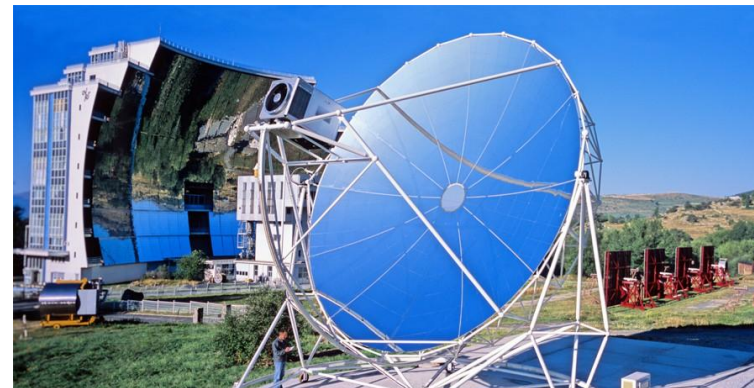
Process	Lowest T °C	Highest T °C	Daily cycle Nb	$E_e/E_m$ ratio	Payback Nb cycle
CSP cylindro	250	390	1	49	$261 \times 3$
CSP tour	400	800	1	153	$84 \times 3$
A CAES	60	650	3	625	$61 \times 3$

Réduction du TRE :

Hybridation solaire CST: projet ANR CEDES



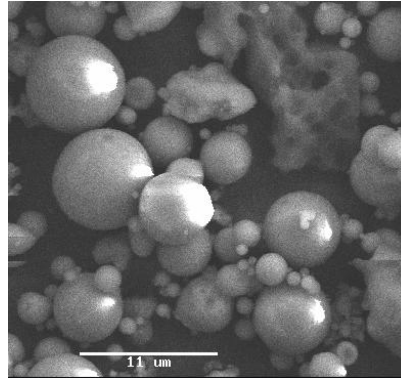
Température max : 3000°C  
Densité de flux : 1 MW/m<sup>2</sup>  
Hybridation solaire + finisseur  
(torche plasma, micro-onde, induction)



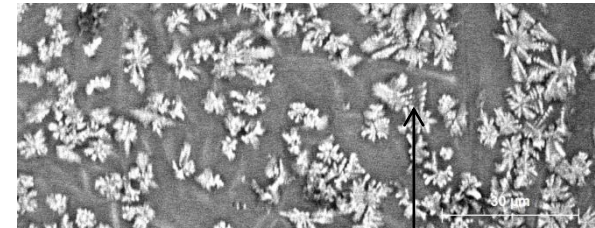
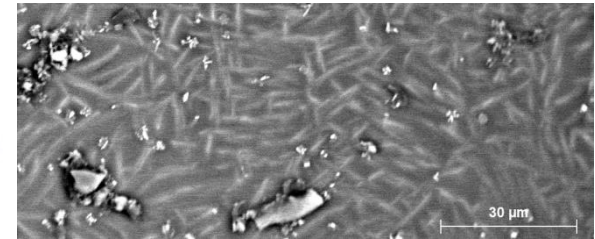


# Extension à d'autres déchets :

## CENDRES VOLANTES CENTRALE AU CHARBON EDF SACRE



Mullite  $(Al_2O_3)_3 \cdot (SiO_2)_2$



Magnetite  $Fe_3O_4$

## LAITIERS SIDERURGIE EDF / ARCELOR MITTAL



**CSP** : 630 à 1500 GWe d'ici 2050 (AIE) soit 315 à 750 Andasol/an

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



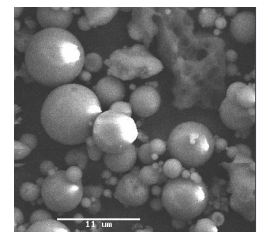
## Déchets amiantés :

174 Mt d'amiante utilisés au XX<sup>ième</sup> siècle dans le monde  
250 000 t/an de déchets amiantés en France



**Cendres volantes MSWI EU(15)** : 1.6 Mt/an

**Coal Fly Ash** : EU(15) 42 Mt/an, Mondial 750 Mt/an



**Laitiers Arcelor-Mittal Europe** :

Slag	Converter	Elec arc furnace	Blast furnace
Prod Europe Mt/an	3	0.5	9
Reuse %	65 (road)	road	100 (cement)





# Résumé conceptuel :

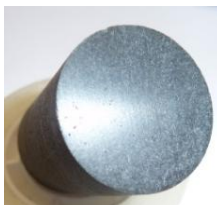


Inertage de déchets  
(gisement, danger, préservation des ressources naturelles)



Développement des procédés d'inertage  
(débouchés valorisants, hybridation solaire)

Retour énergétique



Mises en forme  
(nouvelle activité industrielle,  
valeur ajoutée)



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

Pollutec  
HORIZONS



# Merci de votre attention

