

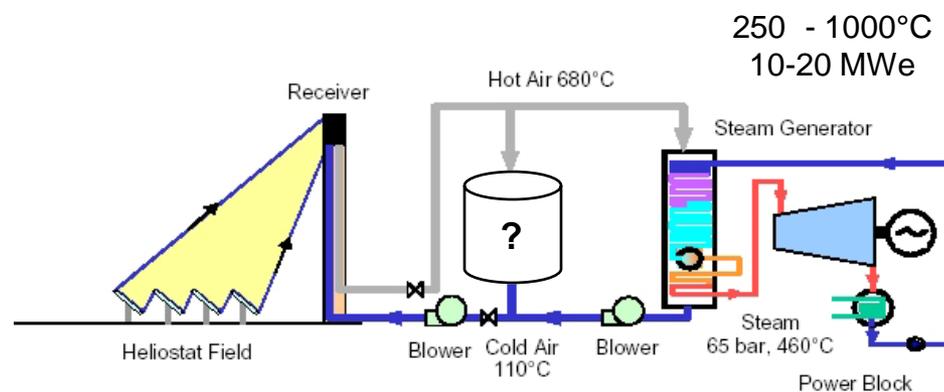
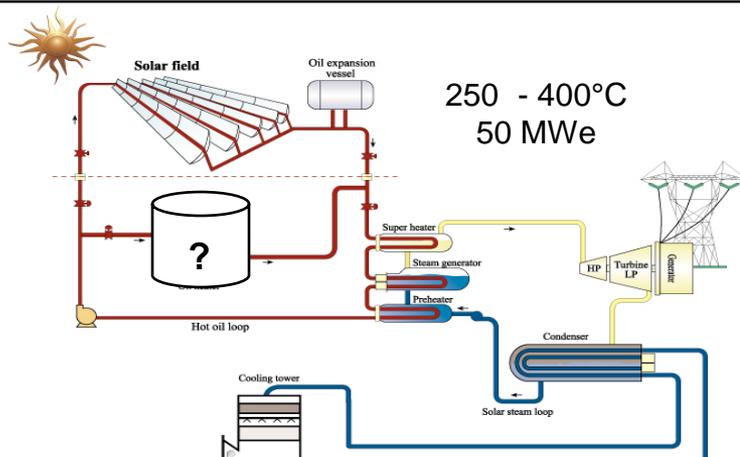
MATERIAUX POUR LE STOCKAGE DE L'ENERGIE THERMIQUE DANS LES CENTRALES ELECTROSOLAIRES

X. Py¹, N. Calvet¹, R. Olivès¹, P. Echegut², C. Bessada², F. Jay³

(1) Laboratoire PROMES CNRS-UPVD UPR 8521 France.

(2) Laboratoire CEMHTI CNRS-UPR 3079 France.

(3) CRISTOPIA Energy System France.



Nécessité d'un stockage de l'énergie

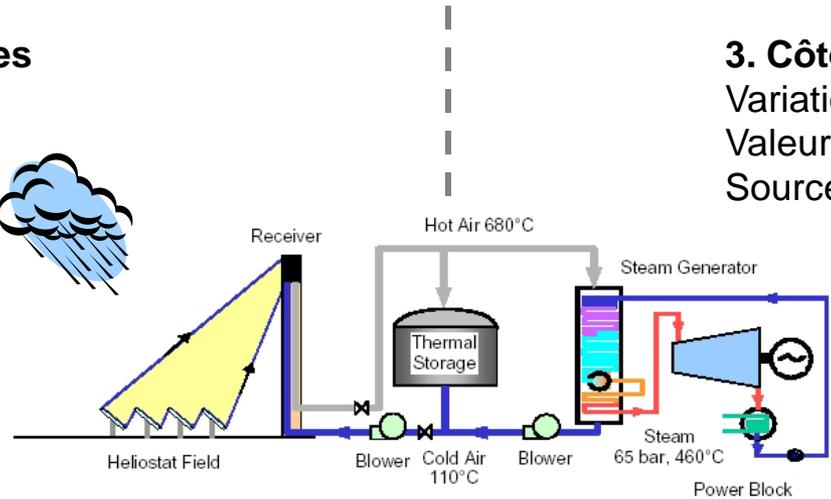
1. Intermittences solaires

- jour/nuit, saisons
- passages nuageux



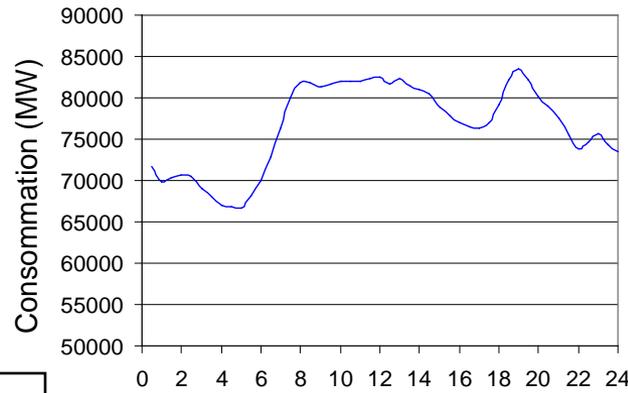
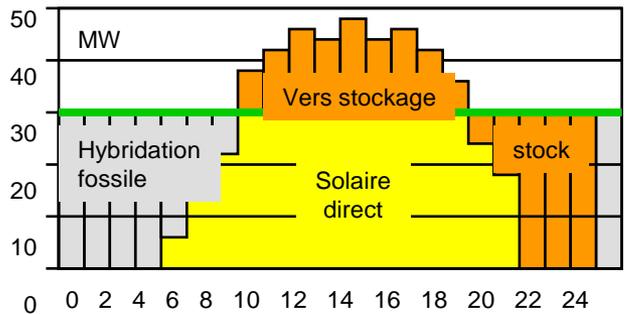
3. Côté demande

Variation de la demande en électricité
 Valeur commerciale du MWh_e
 Sources concurrentielles



2. Courbe d'ensoleillement

- Efficacité
- Maintenance
- Durée de vie

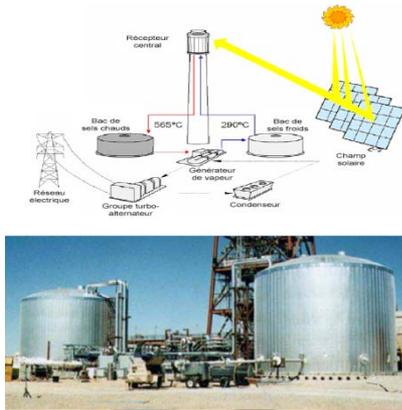


Conséquences :
 Stockage de protection (~ 0.5h)
Stockage de production (~ 7h)

Variation journalière de la consommation d'électricité en France

Exemples de Stockage de l'Energie Thermique (SET) à l'échelle industrielle

SET pour production (X h)



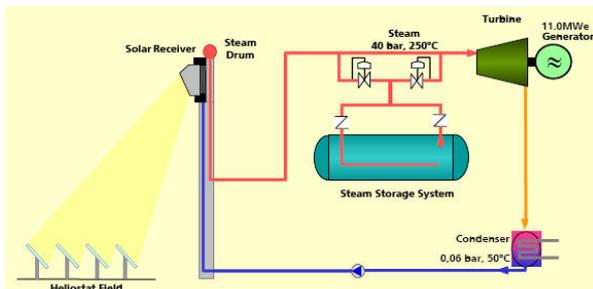
Themis, Solar Two
2 réservoirs sels fondus



ANDASOL Granada : 7h SET
2 réservoirs de sels fondus : 28 000 tonnes

- T max 600°C
- sel : 500-750 euros/t
- SET ~ 15% coût total
- disponibilité
- classification (Europe)

SET pour protection (X min)



PS10 - PS20 Abengoa : 30min SET
Stockage de vapeur Séville

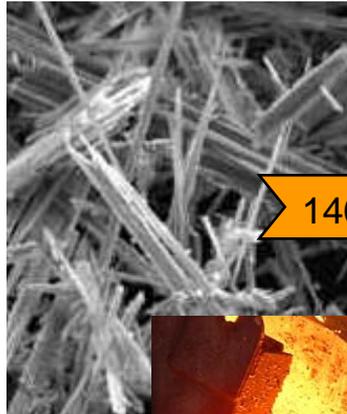
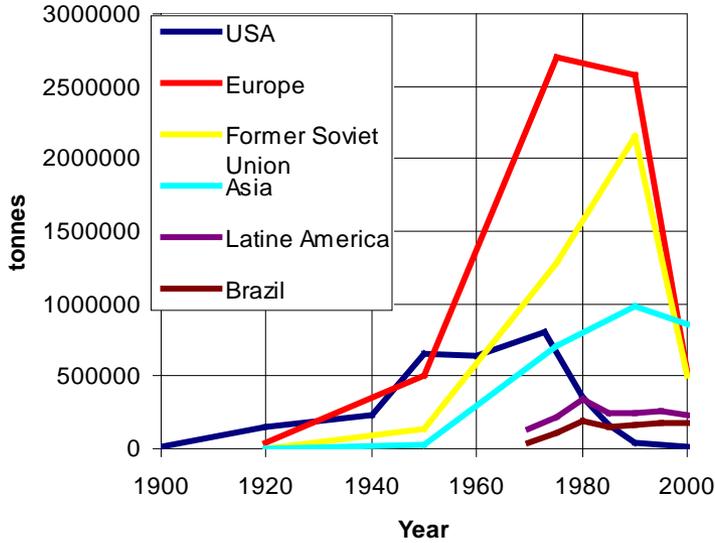
- capacité de stockage
- coût

Critères de sélection des matériaux pour centrales électrosolaires :

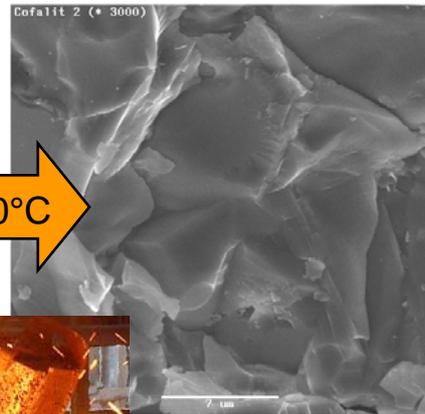
- (1) Faible coût, disponibilité industrielle
- (2) Faible contenu en énergie et en CO₂
- (3) Acceptabilité (green process)
- (4) Stable jusqu'à ~ 1000°C
- (5) Durée de vie ~ 30 years
- (6) Capacité de stockage (~ 1,5 à 3 MJ/(m³ K) soit 0,4 à 0,8 kWh/(m³ K)
- (7) Installation facile
- (8) Transfert thermique et compatibilité avec les fluides de transfert

→ Contraintes fortes !

Matériaux issus de la vitrification d'amiante



1400°C



verre



céramique

COFALIT



Moulage possible



Prix commercial :

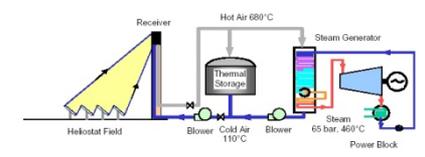
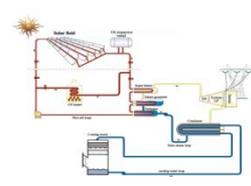
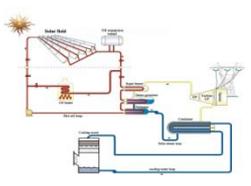
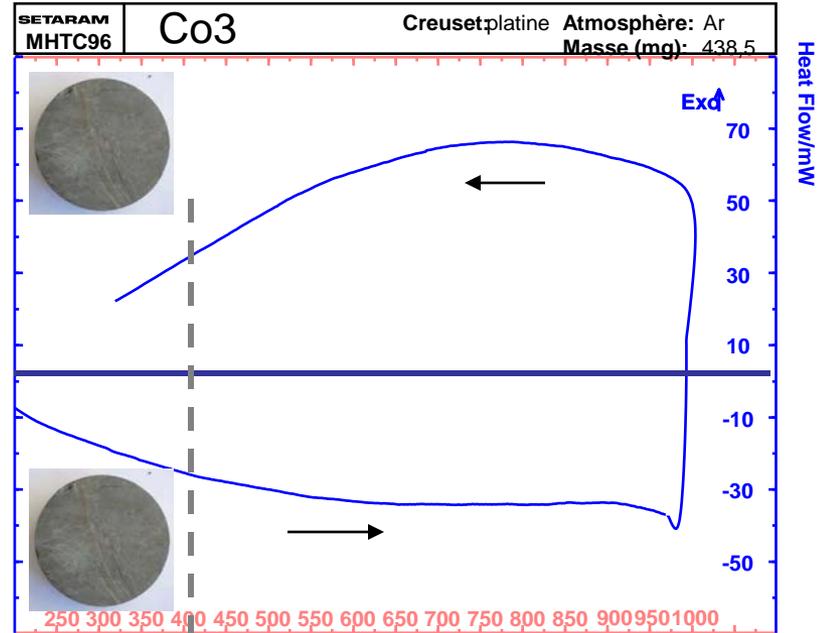
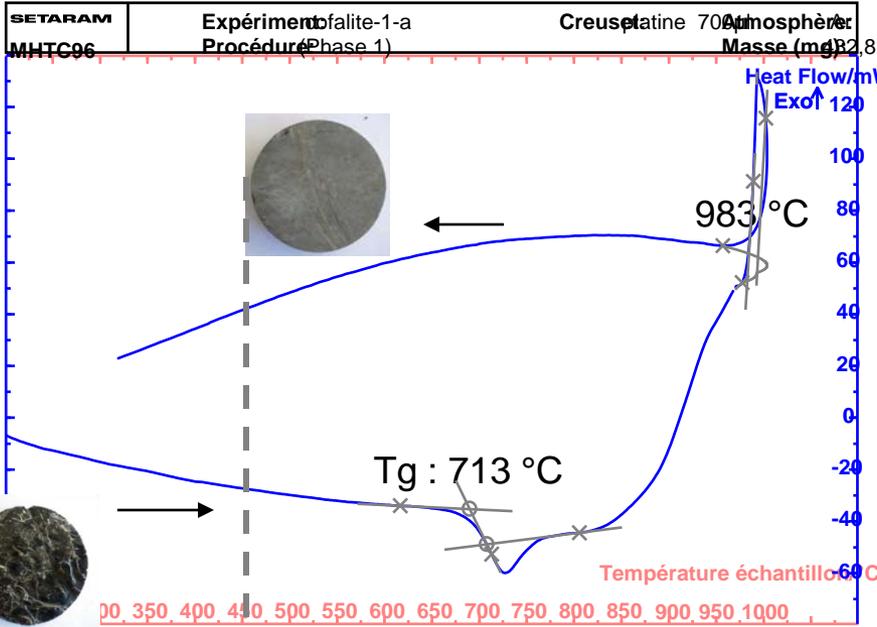
8-10 euros/tonne



Propriétés thermophysiques du Cofalit

Comparaison entre le verre et la céramique

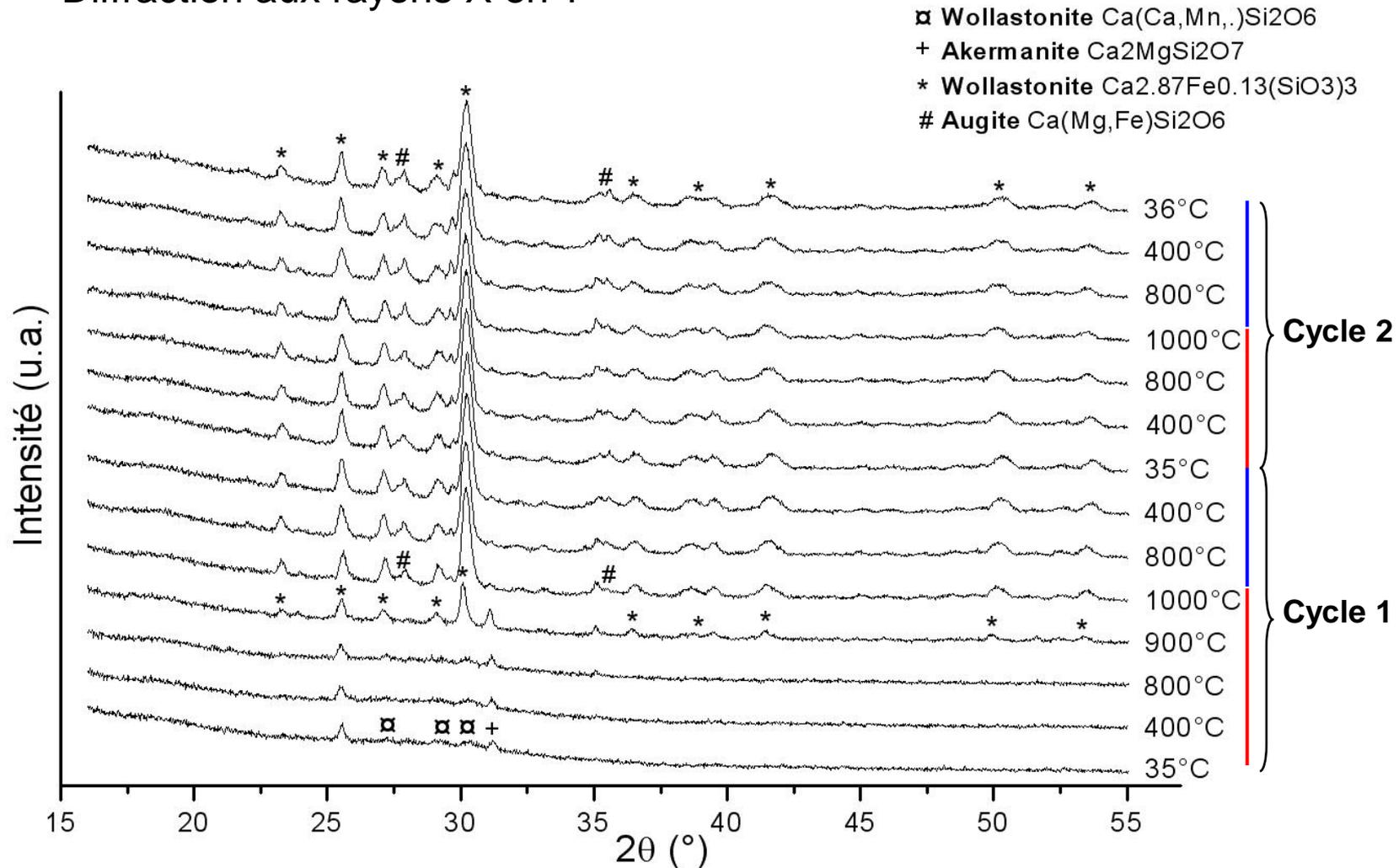
DSC (Setaram MHTC 96) 20 \rightarrow 1000 \rightarrow 20 \leftarrow 20 \circ C 10 \circ /min



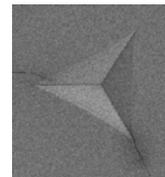
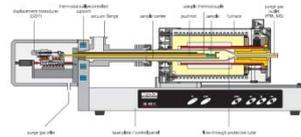
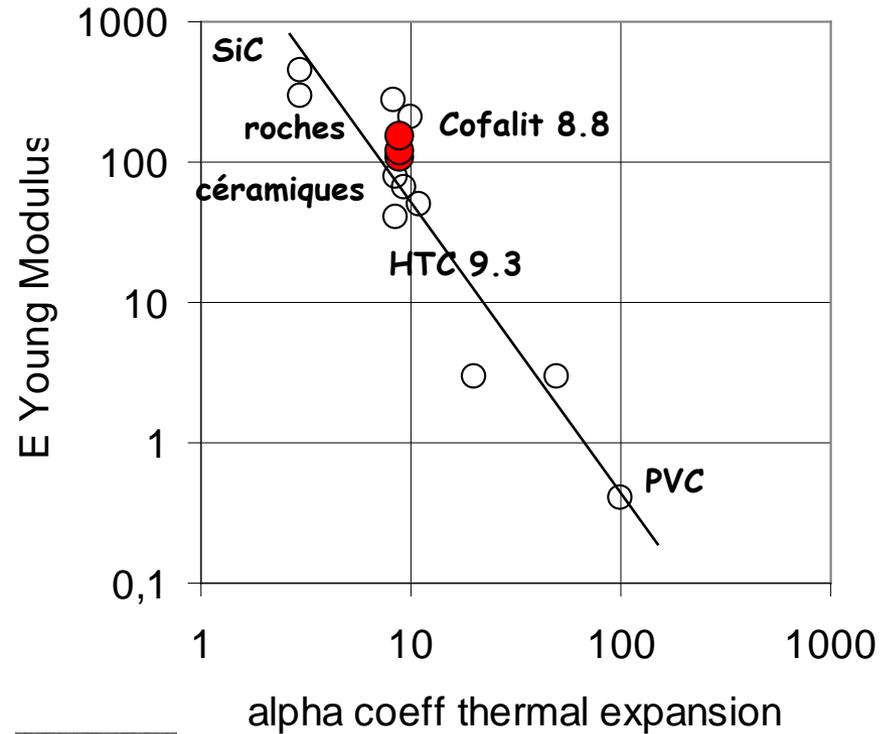
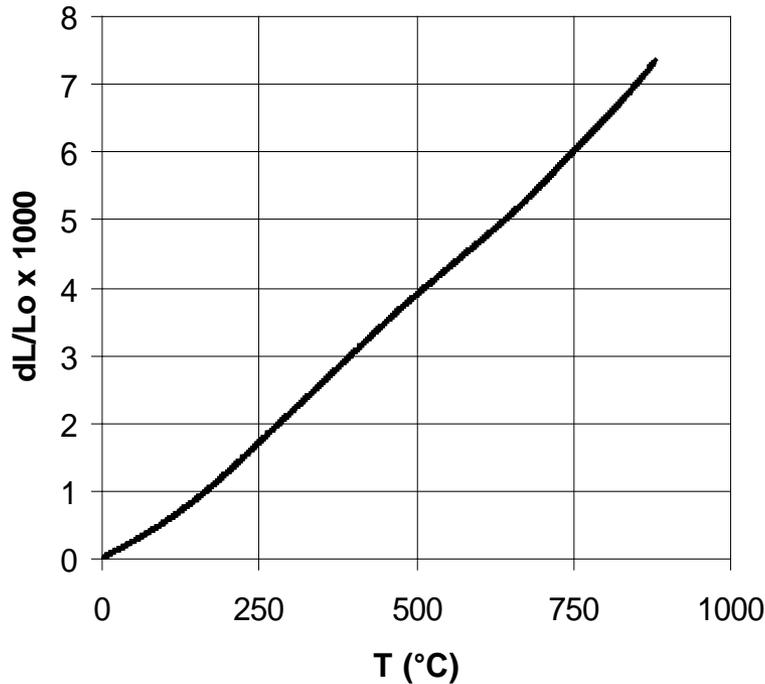
{
}
 Masse volumique : 3100 kg/m³
 Chaleur spécifique : 650 - 860 J/(kg K)

Structure du matériau

Diffraction aux rayons X en T



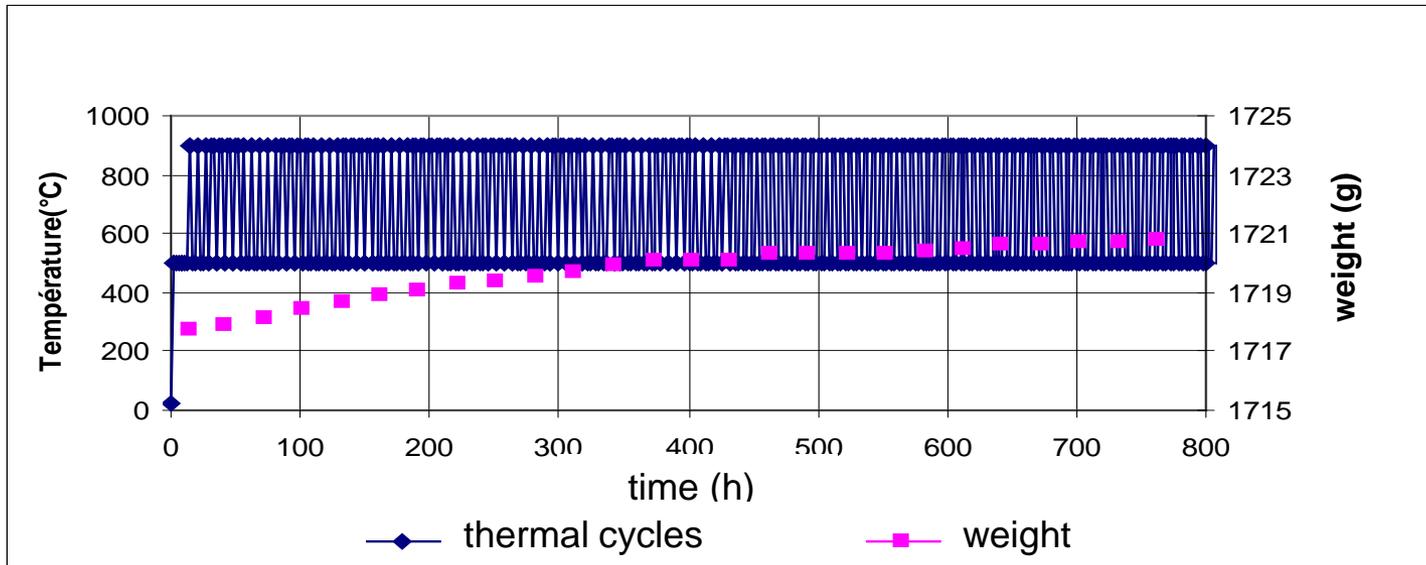
Propriétés mécaniques



Mesure locale de la pénétration : Nanoindenter II MTS
 Dilatomètre : Netzsch DIL-402C

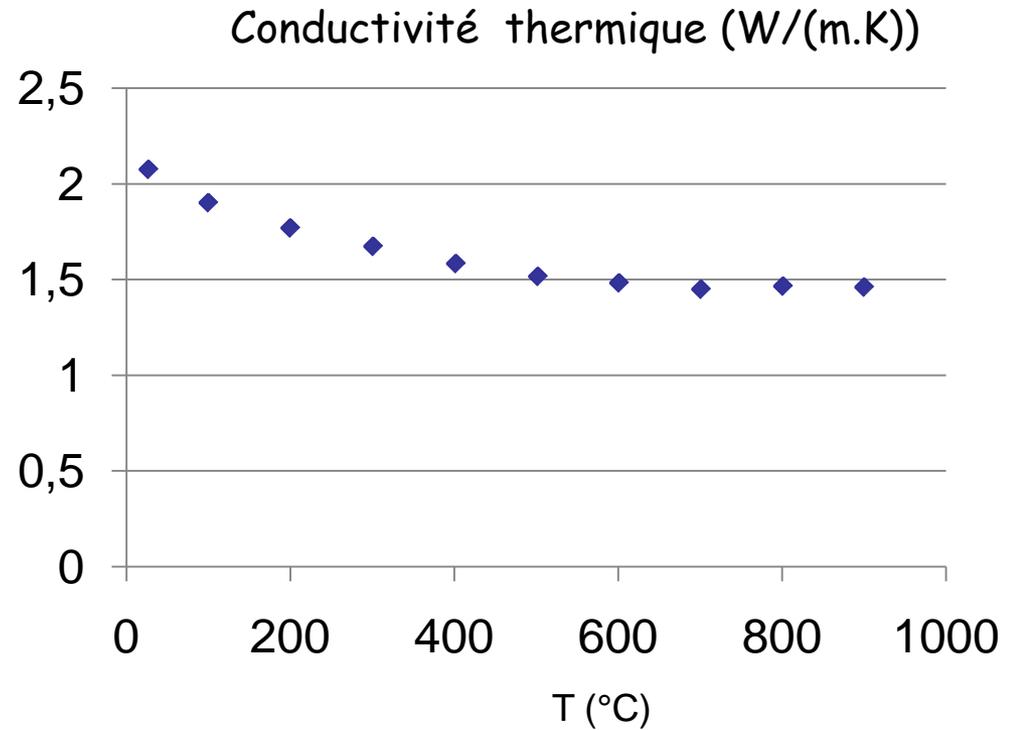
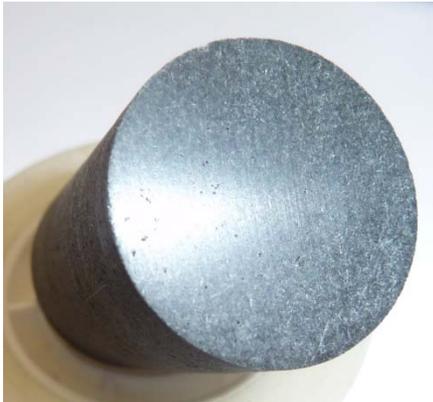
Stabilité du matériau

Cylindre (115 mm) soumis à ~ 200 cycles :
 450 - 900 °C
 cycle de 5h
 sous air



Oxydation en surface : +0,17% après 170 cycles

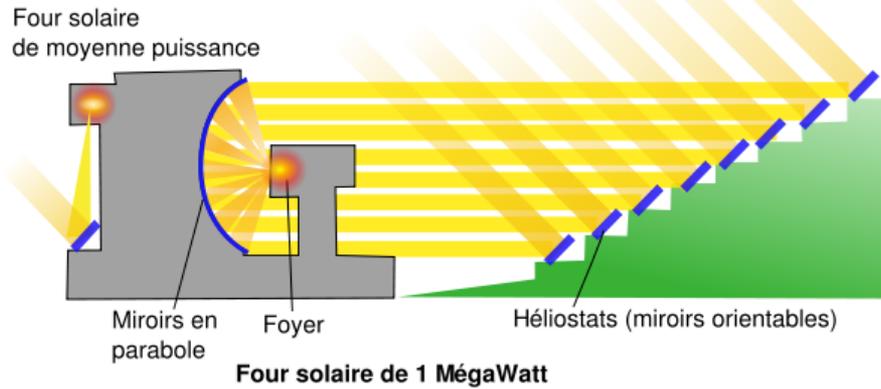
Propriétés thermiques



NETZSCH model 457 *MicroFlash*™

Tests du matériau à haute température

Tenue aux chocs thermiques

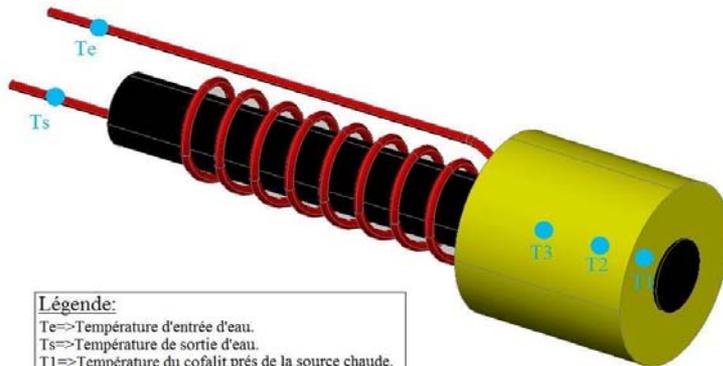


- ✓ $2,5 < \text{Diamètre}_{\text{Cible}} < 40 \text{ cm}$
- ✓ « 10 000 soleils »
- ✓ $300^{\circ}\text{C} < T_{\text{max}}^{\circ}\text{C} < 3200^{\circ}\text{C}$

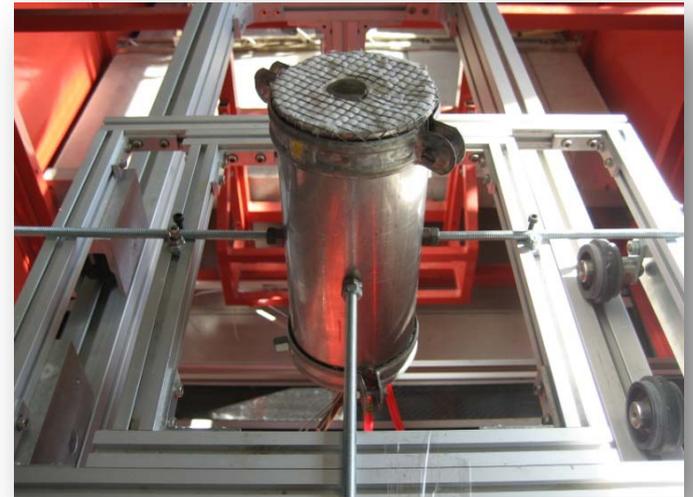


Tests du matériau à haute température

- Barreau de cofalite ($L = 200 \text{ mm}$, $D = 25 \text{ mm}$)
- 3 Thermocouples (type K)
- Echangeur tubulaire
- Isolant laine de roche

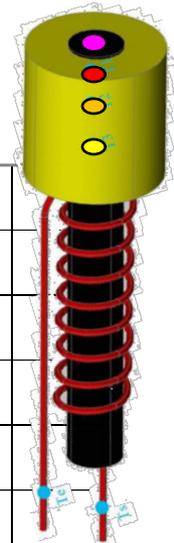
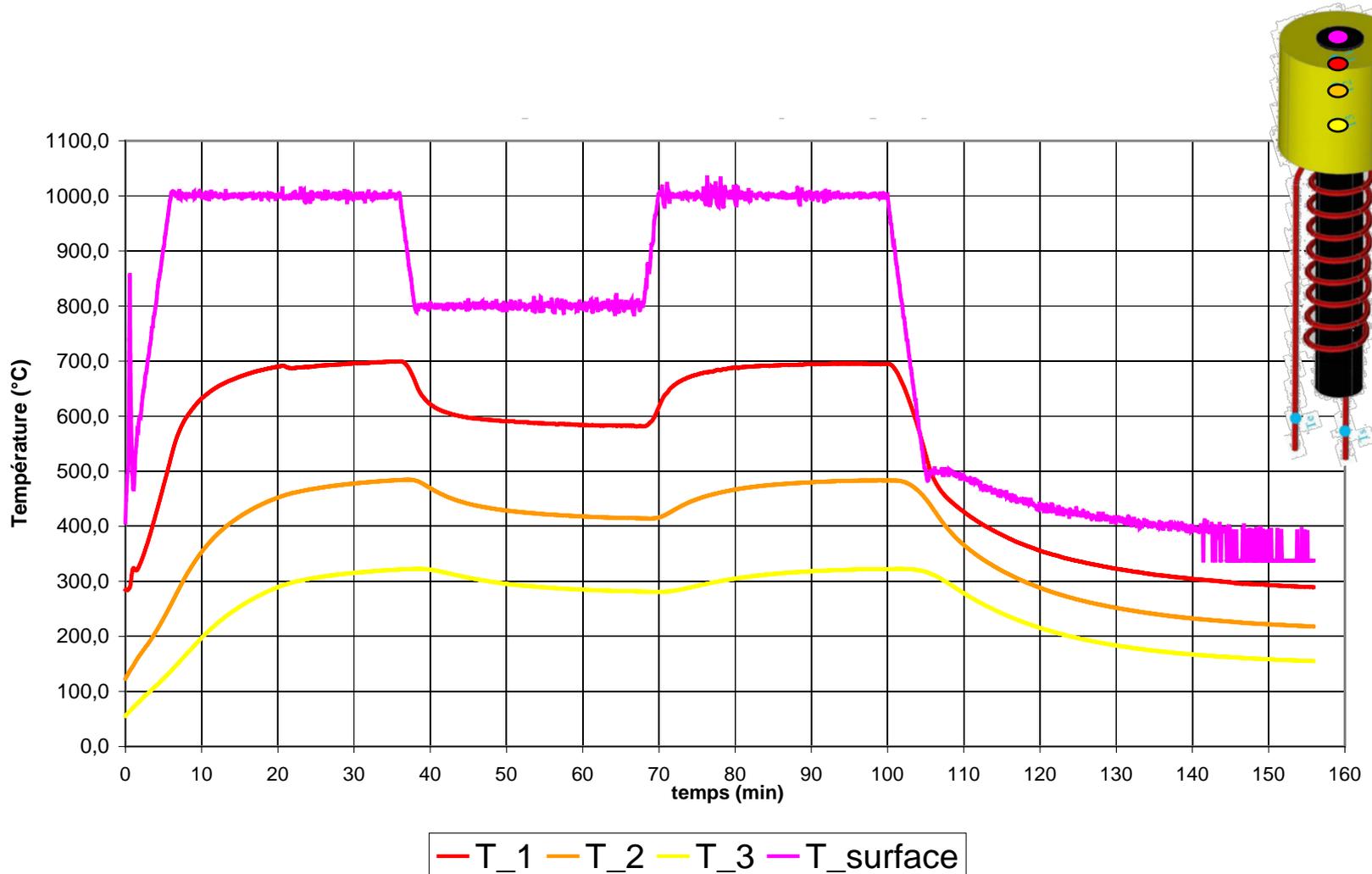
**Légende:**

Te=>Température d'entrée d'eau.
Ts=>Température de sortie d'eau.
T1=>Température du cofalite près de la source chaude.
T2=>Température du cofalite entre les 2 sources.
T3=>Température du cofalite près de la source froide.



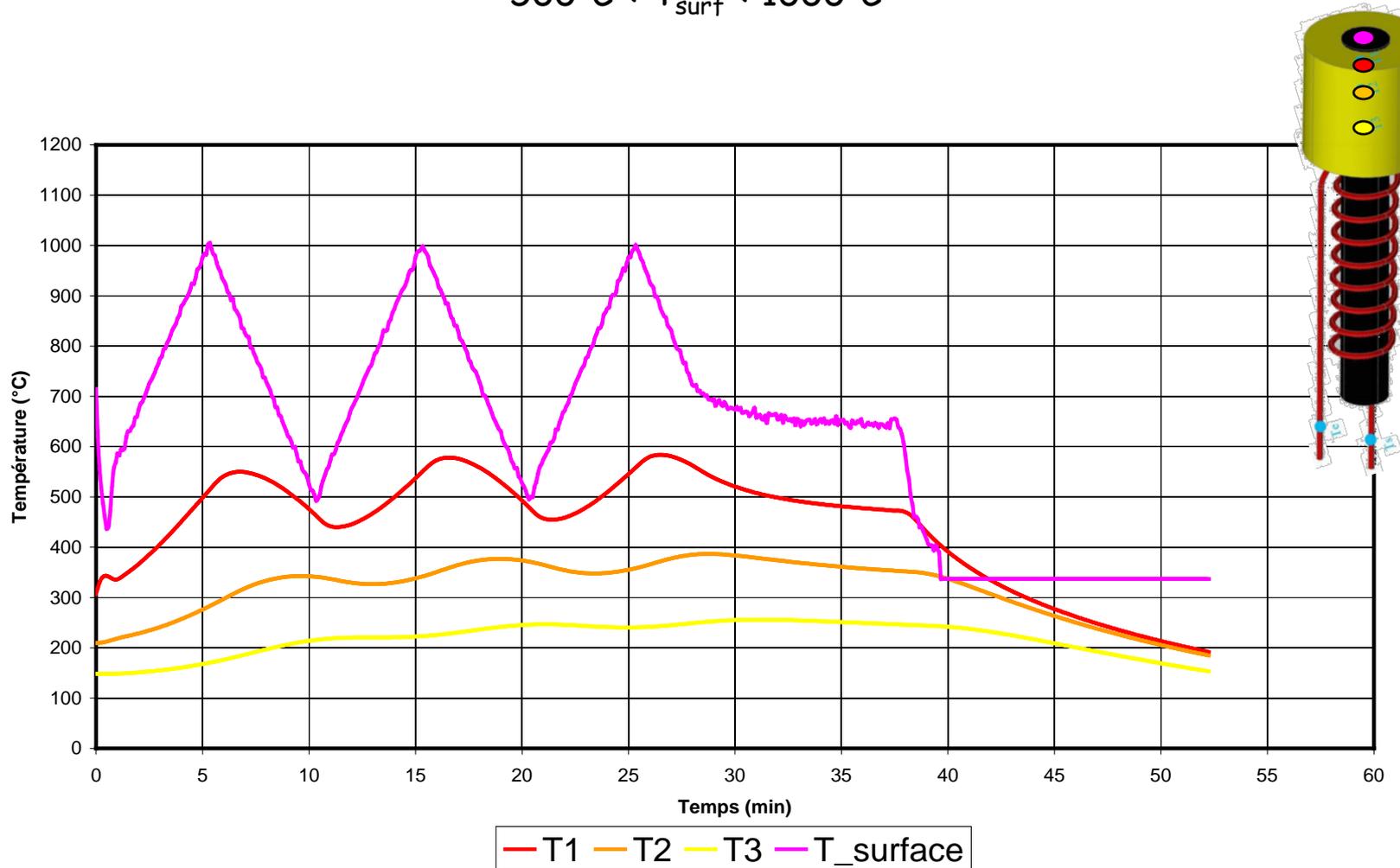
Évolution de la température au cours du temps

$500^{\circ}\text{C} < T_{\text{surf}} < 1000^{\circ}\text{C}$



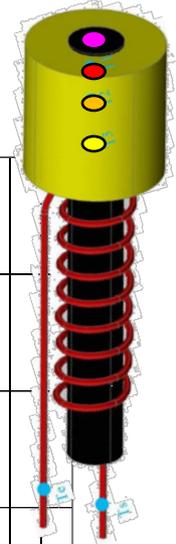
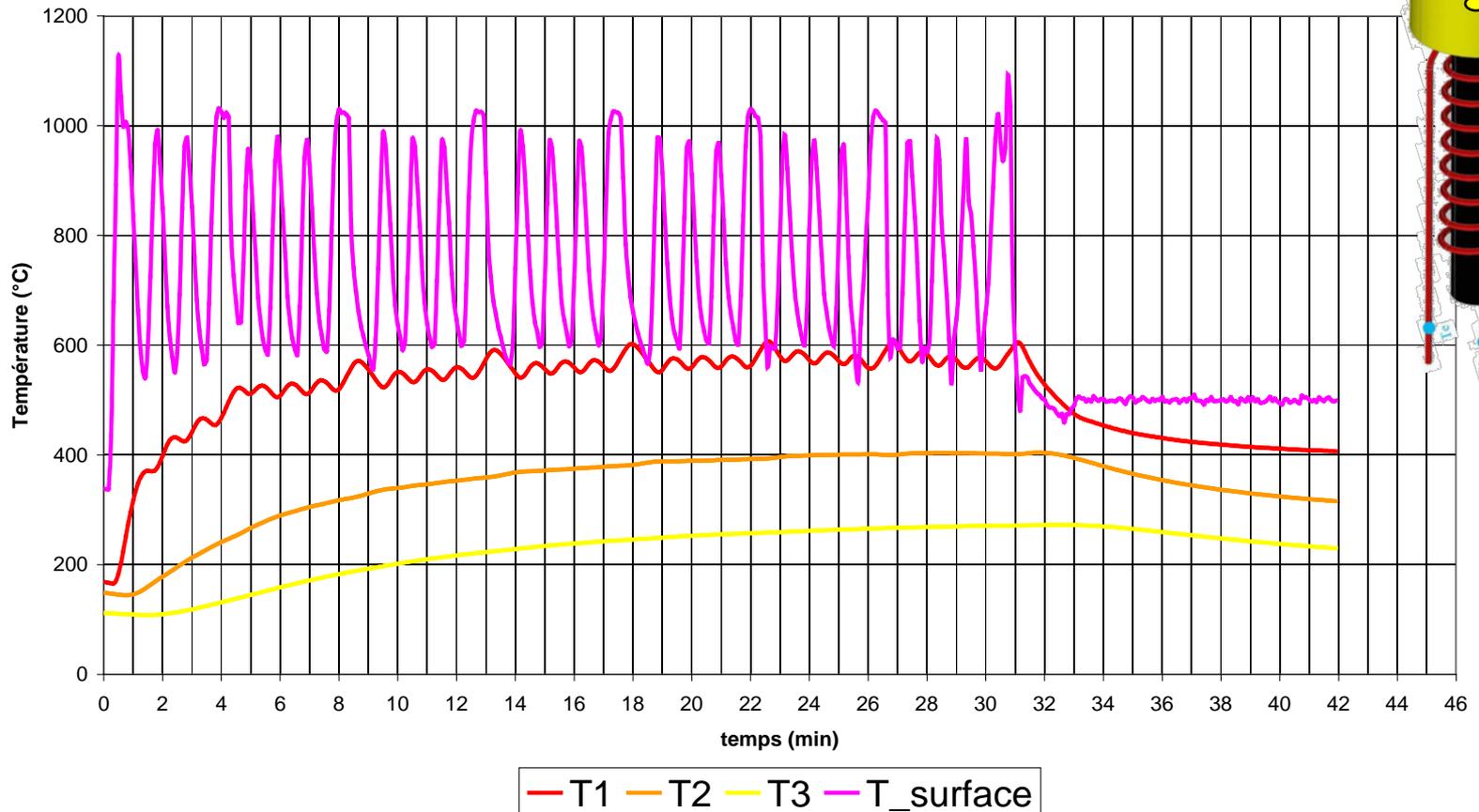
$$dT/dt = 100^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$500^{\circ}\text{C} < T_{\text{surf}} < 1000^{\circ}\text{C}$$



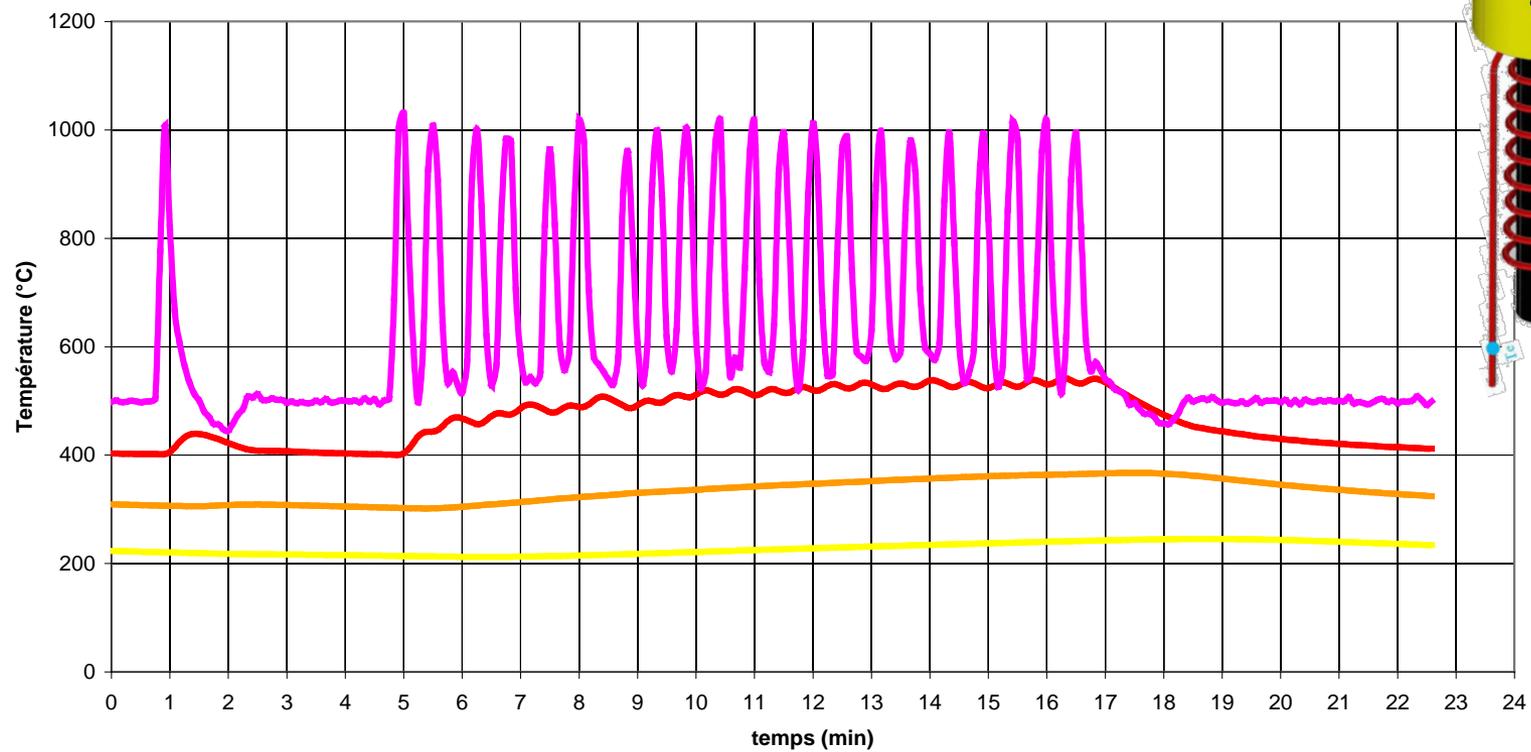
$$dT/dt = 1000^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$500^{\circ}\text{C} < T_{\text{surf}} < 1000^{\circ}\text{C}$$

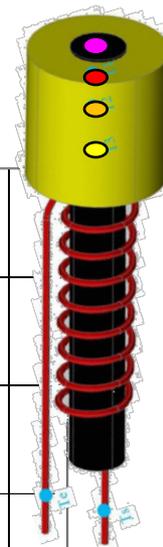


$$dT/dt = 2000^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$500^{\circ}\text{C} < T_{\text{surf}} < 1000^{\circ}\text{C}$$

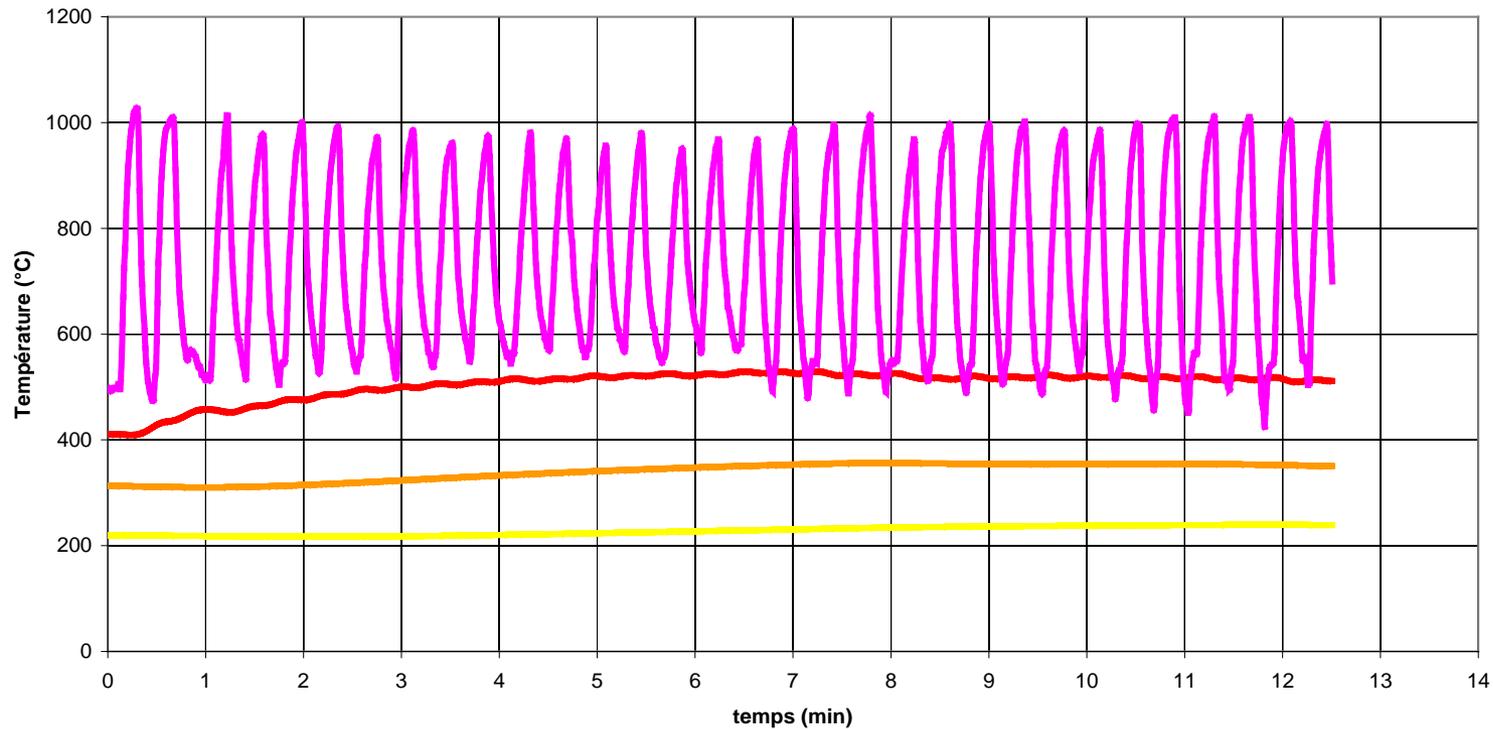
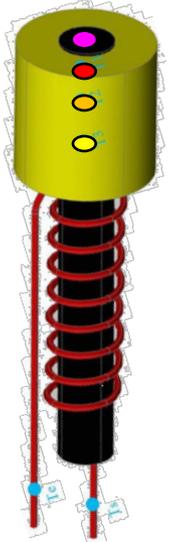


— T1 — T2 — T3 — T_surface



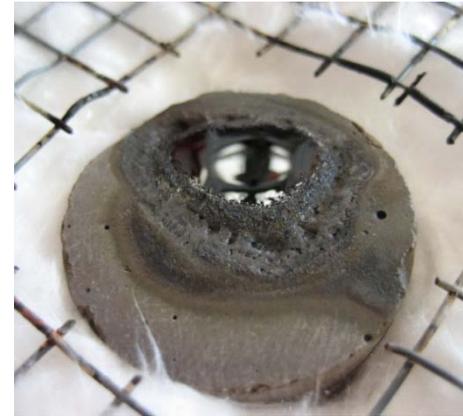
$$dT/dt = 2500^{\circ}\text{C}/\text{min}$$

$$500^{\circ}\text{C} < T_{\text{surf}} < 1000^{\circ}\text{C}$$



— T1 — T2 — T3 — T_surface

Observations



Etape 0

Etape 1
Banc optique
→ T_{max} = 110°C

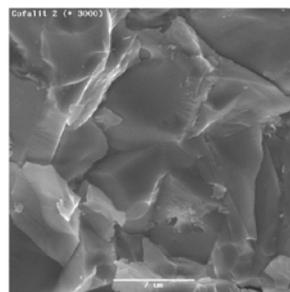
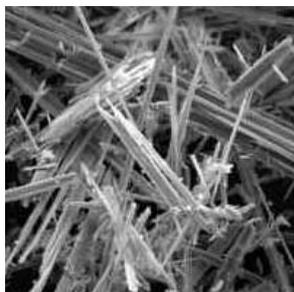
Etape 2
Odeillo I
→ T_{max} = 1100°C

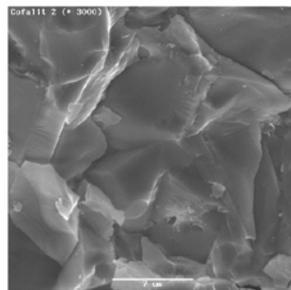
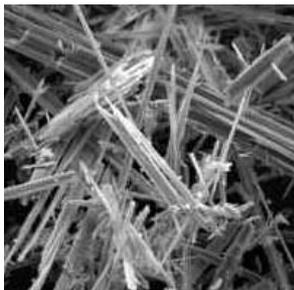
Etape 3
Odeillo II
→ T_{max} 1450°C

- ✓ Pas de fissures apparentes.
- ✓ Maintien des propriétés.

Comparaison avec d'autres matériaux

Materials	HT Ceramics	molten salts	HT concrete	Cofalit
density [kg/m ³]	3500	900 - 2600	2750	3120
Cp [J/(kg K)]	866	1500	916	860
ρ Cp [MJ/(m ³ K)]	3.0	1.35 - 3.9	2.5	2.0 - 2.7
λ [W/(m K)]	1.35	~ 0.15 - 2.0	1.0	1.6 - 2,1
coeff. thermal expansion [10 ⁻⁶ /K]	11.8	---	9.3	8.8
price [euros/tonne]	4500	~ 500-750	80	8
price/ $\rho \times Cp$	47250	600- 7600	550	67





Merci

