

Stockage de chaleur haute température sur matériaux issus du recyclage de déchets industriels. Application au CAES et CSP.

Guilhem DEJEAN^{1,2*}, Amélie KERE¹, Antoine MEFFRE¹, Régis OLIVES¹, Xavier PY¹, Albannie CAGNAC²

¹Laboratoire PROcédés Matériaux et Energie Solaire PROMES-CNRS UPR 8521, Université de Perpignan UPVD, Rambla de la Thermodynamique, Tecnosud – 66100 Perpignan Cedex

²EDF R&D Chatou, 6 quai Watier, 78401 Chatou

* (auteur correspondant : guilhem.dejean@promes.cnrs.fr)

Résumé - Nous proposons ici de valoriser certains déchets industriels pour leur utilisation en tant que matériau de stockage thermique à haute température. Après traitement thermique, on obtient des céramiques réfractaires que l'on peut mettre en forme. Un prototype utilisant comme fluide caloporteur l'air à 1000°C a été mis au point. Il a pour but de valider l'utilisation de ces déchets comme matériaux de stockage de chaleur. Une série de thermocouples permet de suivre les fronts de chaleur, dans l'air comme dans les matériaux. Il est donc possible de caractériser les échanges air-solide et de vérifier la résistance de ces matériaux à des cycles thermiques d'amplitude et fréquence variables.

Nomenclature

C_p	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
T	température, K	<i>Indices et exposants</i>	
heq	coefficient équivalent de pertes thermiques, $W.m^{-2}.K^{-1}$	a	air
S_{canal}	Surface interne du canal d'écoulement, m^2	p	plaque
	débit d'air, $kg.s^{-1}$	e	entree
<i>Symboles grecs</i>		s	sortie
λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$	A, C, E	blocs A, C et E
		amb	ambiante

1. Introduction

Le développement conséquent des centrales solaires thermodynamiques montre les limites des technologies actuelles de stockage de chaleur (température, ressource, coût, ...). Aussi, les nombreux efforts de recherche sur le stockage d'électricité par compression adiabatique d'air (a-CAES) montrent que le stockage thermique est un point clé pour le développement futur de cette technologie. De nouveaux matériaux de stockage de chaleur haute température sont donc à développer.

Nous proposons ici de valoriser certains déchets industriels (laitiers de sidérurgie, cendres volantes, déchets issus du recyclage de déchets amiantés) traités à haute température (>1000 °C) par l'obtention de céramiques réfractaires mises en forme. Les matériaux présentés ici ont été élaborés par la voie pétrurgique : fusion puis coulée en moule et refroidissement contrôlé. Pour vérifier leurs propriétés réfractaires, une boucle de stockage thermique haute température (CAC1000) a été développée. Celle-ci permet de réaliser des cycles stockage-déstockage sur les matériaux proposés, grâce à une circulation d'air à température contrôlée (entre l'ambiante et 1000 °C). Le suivi des fronts de chaleur dans l'air et les matériaux est réalisé à l'aide de thermocouples. Ce prototype a ainsi pour but de valider l'utilisation de ces déchets comme matériaux de stockage de chaleur. L'étude du cyclage thermique conduit à

l'évaluation de l'efficacité de ces matériaux de stockage haute température selon la géométrie et les conditions d'écoulement.

2. Matériel et méthodes

Les premiers travaux présentés ici ont été réalisés sur un matériau mis en forme sous forme de plaque plane de dimensions 10x10x1cm. D'autres géométries (plaque ondulée, vrac, ...) peuvent aussi être étudiées dans le prototype développé.

2.1. Matériau de stockage

Le déchet industriel brut (Cofalit®) se présente sous la forme de granulats. De manière à réaliser des modules de stockage échangeur-stockeur, il paraît intéressant de mettre en forme le déchet industriel de manière à réaliser des pièces de forme de géométrie optimisée. La méthode utilisée ici est la méthode pétrurgique. Cette méthode consiste à mettre en forme le matériau directement en sortie de coulée, puis à réaliser un refroidissement contrôlé de la pièce ainsi formée (voir figure 1).

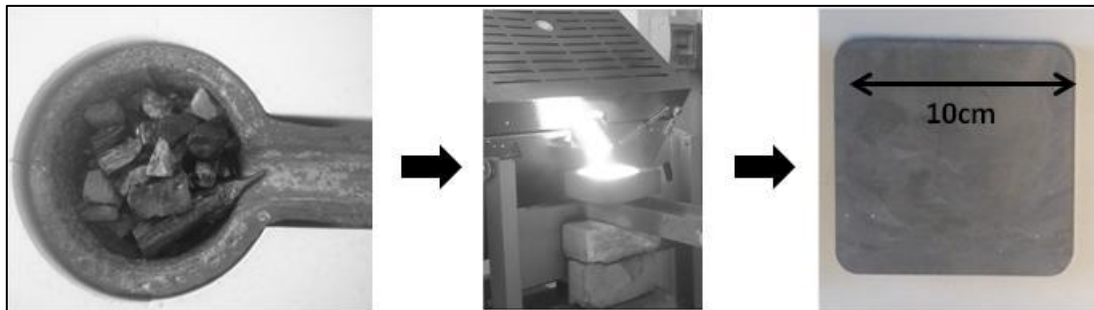


Figure 1 : Mode opératoire pour l'obtention des plaques de matériau

Le contrôle du refroidissement est réalisé de manière à obtenir une microstructure adéquate (réfractaire, céramique à grains fins) qui n'est pas forcément celle du granulat d'origine. Dans le tableau 1, les propriétés de ce matériau sont comparées avec celles des matériaux standards de stockage thermique.

	C_p $J.kg^{-1}.K^{-1}$	ρ $kg.m^{-3}$	λ $W.m^{-1}.K^{-1}$	Prix $€.t^{-1}$
Céramique HT	866	3500	1.35	4500-9000
Sel fondu	1500	900-2600	0.15-2.0	500-750
Béton HT	619	2750	1.0	80
Cofalit	800-1034	3120	2.1-1.4	8-10

Tableau 1 : Cofalit et matériaux standards de stockage thermique HT [1]

2.2. Boucle de stockage CAC1000

Dans le domaine du CAES, le caloporteur utilisé est l'air. De plus, l'avenir des centrales solaires thermodynamiques semble se diriger vers une utilisation de caloporteurs simples tels l'air ou la vapeur d'eau. Dans ces deux cas, un contact direct entre le caloporteur et le matériau de stockage est préférable pour éviter une perte de rendement due à l'utilisation d'un échangeur supplémentaire. L'air a donc été choisi comme caloporteur pour cette boucle de stockage thermique haute température. Celle-ci est présentée sur la figure 2.

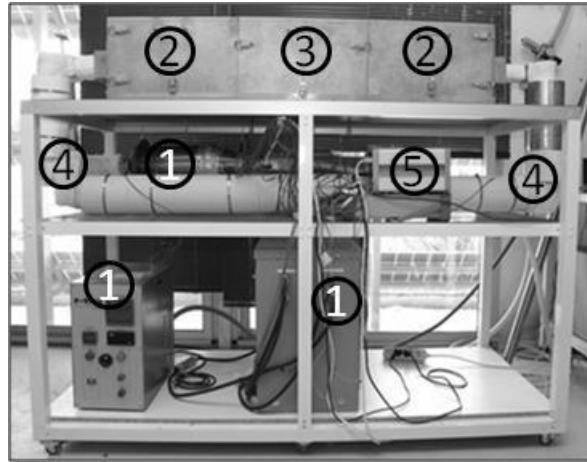


Figure 2 : Boucle de stockage CAC1000

La boucle de stockage comprend :

- Un canon à air produisant $23 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ d'air jusqu'à 1000°C à pression atmosphérique et sa régulation (1)
- Un tunnel isolé (de section carrée $11 \times 11 \text{ cm}$) comprenant 2 sections d'établissement de l'écoulement (2) et un module de stockage (3)
- Des conduites d'air (cylindrique) et registres pour alimenter le tunnel dans un sens ou à contre-courant (4)
- Un système d'acquisition de température et débit (5)

Le tunnel est isolé par 10 cm de plaques de Superwool 607 ($\lambda=0,20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ à 1000°C) et les conduites (DN 1''1/2) par des coquilles en silicate de calcium d'épaisseur 5 cm.

Le module de stockage est formé par cinq empilements de cinq plaques planes ($10 \times 10 \times 1 \text{ cm}$) espacées par des cales cylindriques d'1 cm de diamètre et d'épaisseur. La figure 3 schématise l'empilement.

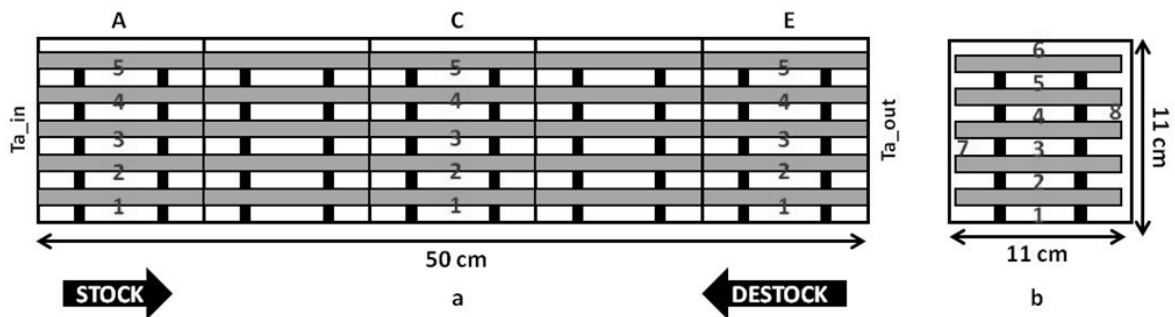


Figure 3 : Module de stockage et positionnement des thermocouples (vue de côté (a) et de face (b))

L'air dont on contrôle la température en entrée circule donc dans les interstices entre les plaques. Les registres permettent, si nécessaire, d'inverser le sens de circulation de l'air (lors d'un déstockage par exemple). Les températures sont mesurées à l'aide de 40 thermocouples de type K.

Dans l'ensemble des courbes expérimentales proposées par la suite, il est question de températures moyennes. Sur l'air, en entrée comme en sortie (T_{a_in} et T_{a_out}), nous représenterons une température moyenne (effectuée sur 8 thermocouples disposés comme présenté en figure 3b). Pour la température du solide, nous prendrons 3 températures moyennes T_A , T_C et T_E correspondants aux blocs A, C et E (voir figure 3). Ces moyennes

sont effectuées sur 5 thermocouples placés au contact de la surface des plaques, en leur centre (voir figure 3a).

3. Résultats

Toutes les expériences présentées ici ont été réalisées avec le même lot de plaques planes (7 kg environ de matériau de stockage). L'énergie stockée maximale est d'environ 4520 kJ à 850°C.

3.1. Phase de stockage

La figure 6 montre l'évolution de la température en fonction du temps pour l'air (entrée et sortie du module de stockage, tirets) et la surface du solide (blocs A, C et E, trait plein). Sont aussi représentés (pointillés) les différences de température entre bloc A et E et entre surface et cœur pour une plaque du bloc A (axe de droite). Dans cette expérience, le débit est maximum ($23 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) et la rampe de montée en température de $25^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$.

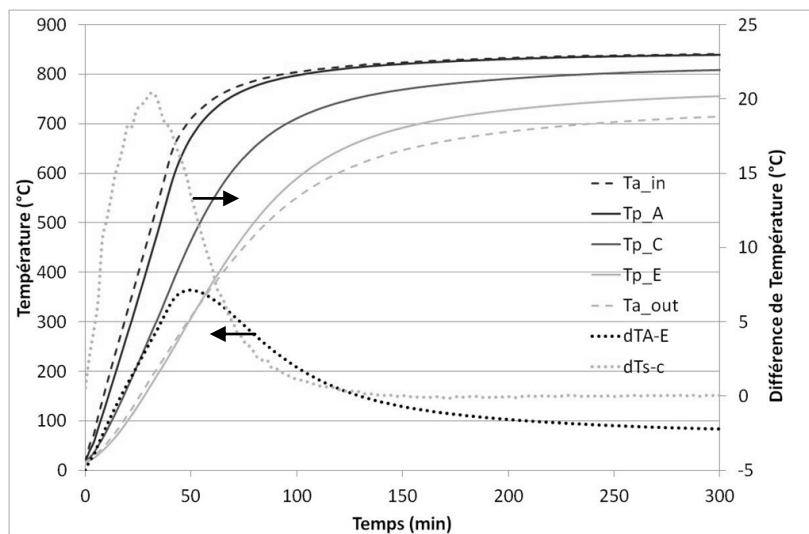


Figure 4 : Température au cours du temps en phase de stockage

Il est possible d'observer dans un premier temps un déphasage mis en valeur par la courbe de différence de température entre les blocs A, C et E. Cette différence de température dépasse les 360°C à 50 min. Ceci met bien en valeur qu'il y a stockage de chaleur dans les plaques des blocs précédents, l'air arrivant ainsi plus froid au contact du bloc E (déplacement du front de chaleur). Cependant, le bloc E commence à monter en température alors que le bloc A n'a pas atteint sa température d'équilibre. Pour augmenter le déphasage il faudrait donc augmenter la longueur du module de stockage ou le coefficient d'échange convectif. La courbe de différence de température entre surface et cœur de plaque (d_{Ts-c}) confirme qu'il y a stockage d'énergie. Nulle au départ, cette différence augmente pour atteindre environ 20°C à 30 min, et redescendre au-dessous des 1°C vers 100 minutes. Il y a donc transfert thermique entre la surface et le cœur de la plaque pendant ces 100 premières minutes, avec un gradient maximal de 20°C . Les puissances correspondantes sont visibles en figure 5.

Dans un second temps, on peut noter que les températures d'équilibre, atteintes avec un déphasage de l'ordre de 200 min, ne sont pas identiques entre les blocs (830°C pour le bloc A contre 765°C pour le bloc E). Ceci traduit des pertes thermiques non négligeables malgré les 10 cm d'isolation. Il est donc envisagé d'améliorer cette dernière.

Le régime permanent atteint, il est néanmoins possible de déterminer un coefficient équivalent de pertes thermiques h_{eq} par la mesure de différence de température sur l'air entre entrée et sortie du module de stockage. On a alors :

Le coefficient de pertes thermiques équivalent pour un débit d'air de $23\text{Nm}^3/\text{h}$ à 850°C déterminé de cette manière est d'environ $6,65\text{ W/m}^2/\text{K}$.

La figure 5 présente la puissance de stockage (tiret) et l'énergie stockée (trait plein) au cours du temps. La puissance stockée par le bloc A est nettement supérieure à celles stockées par les blocs C et E. Ceci est dû au fait que, tout au long de la phase de stockage la différence de température air-matériau est plus importante en entrée qu'en sortie du module de stockage. De plus, la courbe de puissance de stockage du bloc A chute plus rapidement que celles des blocs suivants. Ce déphasage confirme le déplacement du front de chaleur le long du module de stockage. Le bloc A stocke donc plus rapidement que le C puis le E (observation confirmée par les courbes d'énergie stockée).

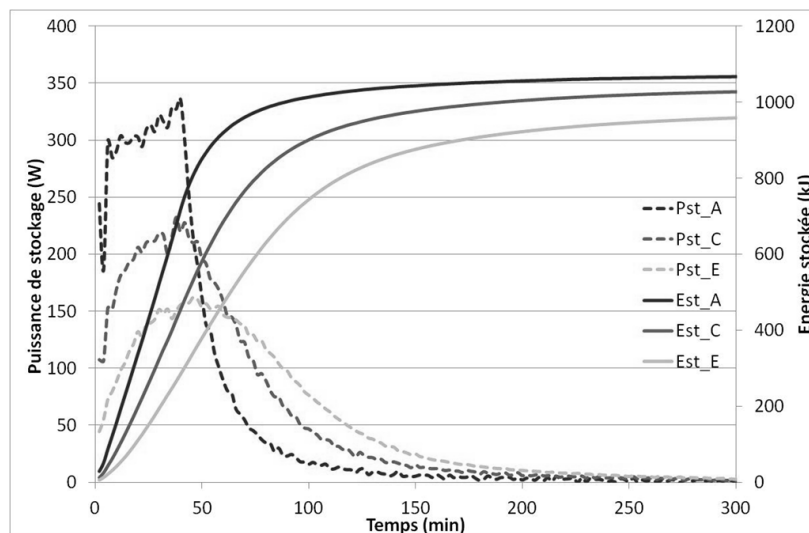


Figure 5 : Puissance et énergie stockée au cours du temps

Les pertes thermiques observées précédemment se traduisent ici par une différence d'énergie stockée. L'importance de ces pertes thermiques devrait être inférieure dans un module industriel comportant une meilleure isolation ainsi qu'une surface spécifique d'échange avec l'extérieur plus faible que dans le cas de ce prototype.

Ces différents éléments ont donc permis de valider ce prototype pour le stockage de chaleur dans ces matériaux mis en forme. On envisage donc d'augmenter l'isolation pour diminuer les pertes thermiques, et améliorer l'échange air-solide en augmentant le coefficient de convection par l'utilisation de plaques ondulées par exemple. Les fronts de chaleur devraient alors être plus marqués, et le déphasage entre blocs plus important.

3.2. Cyclages

La figure 7 présente des cyclages d'une amplitude supérieure à 600°C et d'une période de 6h. Le débit et les rampes de montée et de descente sont inchangés (de $23\text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ et $25^\circ\text{C}.\text{min}^{-1}$). La position des registres reste inchangée et l'air circule toujours dans le même sens, en stockage comme en déstockage. La fréquence est ici trop importante pour atteindre la température du régime permanent des blocs C et E. On peut observer une répétabilité des cycles (température d'air, de plaques et différence de température entre blocs A et E

reproductibles) prouvant que le matériau résiste à un enchaînement de chocs thermiques de ce type. 27 cycles ont été enchaînés sans observer de dégradation des plaques.

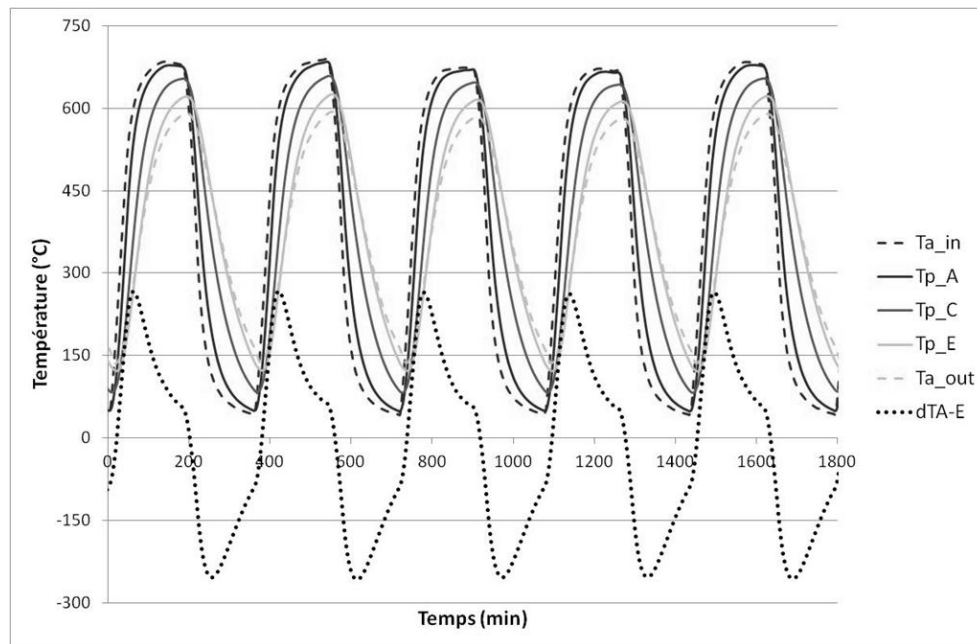


Figure 6 : Sollicitations dynamiques entre 50°C et 650 °C

4. Conclusion

Cette boucle de stockage air chaud a donc permis de valider l'utilisation de ces déchets industriels pour le stockage thermique. Les plaques obtenues par fusion et mise en forme du déchet industriel brut ont été cyclées en température jusqu'à 830 °C. Aucune plaque n'a été endommagée et aucunes variations de masse ou apparitions de fissures n'ont été observées. Les plaques sont donc, dans ces conditions, résistantes au contact direct de l'air. Des pertes thermiques vers l'extérieur ont été mises en valeur. Celles-ci, caractéristiques de ce prototype et non de ce mode de stockage, pourraient être diminuées par la modification de l'isolation. Aussi, si l'on veut augmenter le déphasage entre les différents blocs, le coefficient d'échange convectif air-solide doit être amélioré. On peut envisager d'utiliser d'autres types de géométries (plaques ondulées, vrac) conduisant à l'intensification des échanges et l'accroissement de l'efficacité du stockage thermique.

Références

- [1] X. Py, N. Calvet, R. Olivès, P. Echegut, C. Bessada, F. Jay, Thermal storage for solar power plants based on low cost recycled material, EFFSTOCK, the 11th International Conference on Thermal Energy Storage, (Stockholm, Suède, 14-17 juin 2009)

Remerciements

Les différents auteurs tiennent à remercier les sociétés Europlasma, Inertam, et Arcelor-Mittal pour leur précieuse collaboration et la fourniture d'échantillons de déchets. Leurs vifs remerciements vont aussi aux ANR SEED-SACRE et SEED-SESCO pour le financement, et à EDF et l'ANRT pour le financement d'une thèse CIFRE.