Eco-Stock® - Solution de stockage de la chaleur compétitive : Etude de la robustesse

Aubin Touzo, Régis Olivès, Guilhem Dejean, Doan Pham Minh, Mouna El-Hafi, Xavier Py

▶ **To cite this version:**

Aubin Touzo, Régis Olivès, Guilhem Dejean, Doan Pham Minh, Mouna El-Hafi, et al.. Eco-Stock® - Solution de stockage de la chaleur compétitive : Etude de la robustesse. SFT 2020 - 28 ème congrès Franças de Thermique, Jun 2020, Belfort, France. pp.247-254, 10.25855/SFT2020-099 . hal-02928623

HAL Id: hal-02928623

https://imt-mines-albi.hal.science/hal-02928623

Submitted on 2 Sep 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Eco-Stock® - Solution de stockage de la chaleur compétitive : Etude de la robustesse

Eco-Stock® - Competitive heat storage solution: robustness analysis

Aubin Touzo[1]*, Régis Olives[1], Guilhem Dejean[2], Doan Pham Minh[3], Mouna El Hafi[3], Xavier Py[1]

[1]PROMES-CNRS Laboratoire PROcédés, Matériaux et Energie Solaire - Université de Perpignan - Tecnosud, Rambla de la Thermodynamique, 66100 Perpignan, France
[2]SAS Eco-Tech Ceram, Espace Entreprises Méditerranée, Rue Edouard Belin, 66600 Rivesaltes, France
[3]Université de Toulouse, IMT Mines Albi, UMR CNRS 5302, Centre RAPSODEE, Campus Jarlard, 81013 Albi, cedex 09, France

Résumé

La société Eco-Tech Ceram a développé un stockage thermique de taille industrielle pour la valorisation de chaleur fatale jusqu'à 600°C : l'Eco-Stock®. Il s'agit d'une unité de 2 MWh_{Th}, contenant 16 t de céramique réfractaire. La robustesse aux variations de température et de débit est testée afin de montrer que l'Eco-Stock® est adapté aux contraintes des gisements de chaleur fatale, impliquant de fortes variations de température, de débit et des périodes de stand-by.

Mots-clés : stockage thermique, Eco-Stock®, régénérateur, robustesse, chaleur fatale

Abstract

The company Eco-Tech Ceram developed an industrial scale thermal storage designed to recover waste heat up to 600°C: the Eco-Stock®. This unit of 2 MWh_{Th} contains 16 tons of refractory ceramic. The robustness regarding the variation of inlet temperature and flowrate is tested to show that the Eco-Stock® matches with the constraints of waste heat sources, involving sharp variation temperature and flowrate but also stand-by period.

Keywords: thermal storage, Eco-Stock®, regenerator, robustness, waste heat

Nomenclature

A	aire, m^2
Bi	nombre de Biot, -
C_p	capacité calorifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$
$\dot{m}$	débit massique, $kg.s^{-1}$
Q	variation d'enthalpie, J
h	coef. d'échange convectif, $W.m^{-2}.K^{-1}$
k	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
T	température, °C
V	volume, m^3
u	vitesse, $m.s^{-1}$
t	temps, s
x	longueur de lit, m
Symboles grecs	
γ	rendement
ε	porosité
ϱ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
Indices et exposants	
ch	charge
d	décharge
end	fin de charge ou de décharge
eff	effectif
ext	extérieur
f	fluide
s	solide
v	échange fluide/solide
w	paroi

https://doi.org/10.25855/SFT2020-099

1. Introduction

Les industries du verre, de l'acier et du ciment perdent 11 à 29 % de l'énergie qu'elles consomment sous forme de gaz chauds [1]. Cette chaleur dite fatale n'est que très peu valorisée car elle comporte de fortes intermittences et un déphasage vis-à-vis des besoins. La société Eco-Tech Ceram a développé l'Eco-Stock®, une unité de stockage de chaleur de 2 MWh_{Th} à 600°C, qui permet de valoriser cette chaleur perdue. L'énergie est stockée sous forme de chaleur sensible grâce à 16 tonnes de bauxite. La robustesse d'un prototype de stockage du même type mais de 300 kg a été testée par Lopez-Ferber *et al.* [2]. L'étude proposée porte sur la robustesse de l'unité industrielle de 16 t soumise à de fortes variations de température et de débit. Un modèle numérique est aussi présenté afin d'être comparé aux résultats expérimentaux.

2. Installation expérimentale

Le banc expérimental est composé de l'unité de stockage thermique, d'un skid et d'une armoire électrique (fig. 1) à droite, centre, gauche respectivement. Le stockage est une cuve rectangulaire de dimension 1,7 x 1,7 x 3,08 m, remplie des particules de bauxite (diamètre caractéristique 30 mm) et isolée grâce à 100 mm de brique réfractaire. Le skid est un système aéraulique permettant la gestion des flux dans le stockage grâce à l'admission d'air, au ventilateur, à un canon à air chaud (500 kWe), à la cheminée ainsi qu'à un système de vannes.

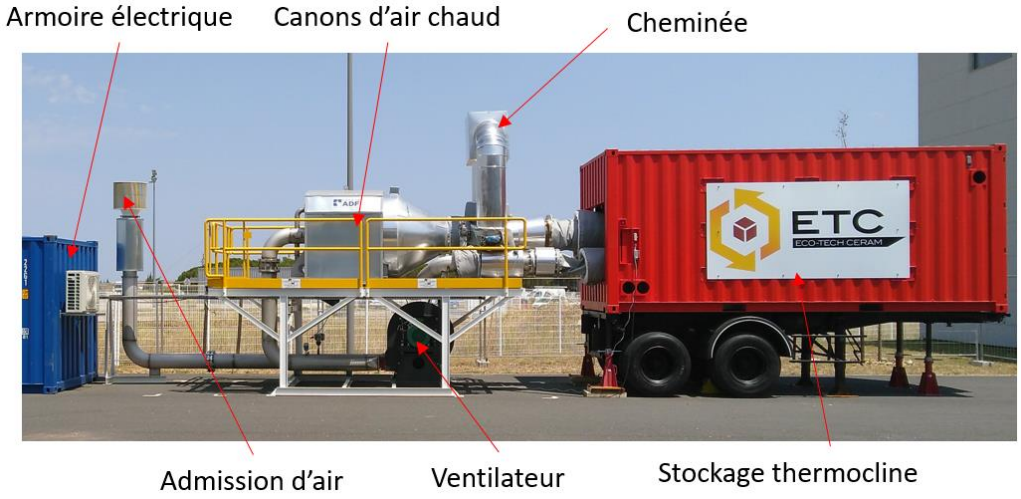

Figure 1: Banc expérimental

La figure 2 présente le schéma procédé de ce banc durant la charge et la décharge.

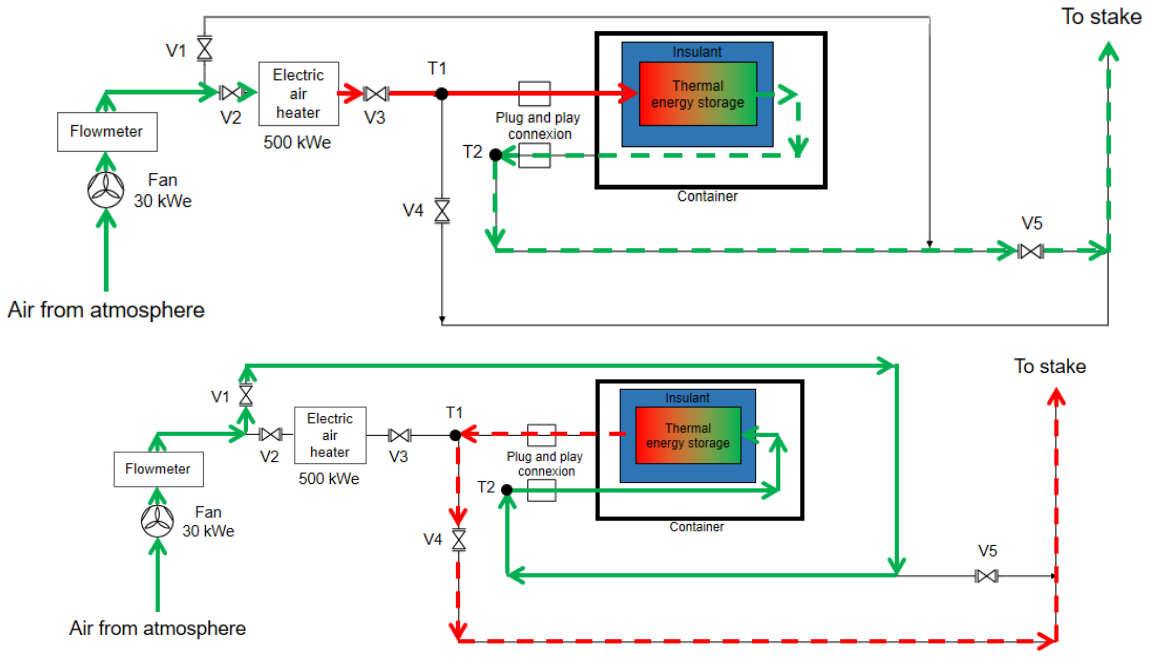

Figure 2: Schéma procédé banc de test durant la charge (en haut) et la décharge (en bas)

L'air chaud injecté dans le stockage réchauffe la céramique et vient former un gradient de température dans le stockage, appelé « thermocline ». La Figure 3 montre la position des 33 thermocouples de type K qui permettent de suivre le front de chaleur. Les sections A, B et C sont chacune équipées de 3 rangées de 3 thermocouples, situées à 150, 850 et 1550 mm de la paroi supérieure.

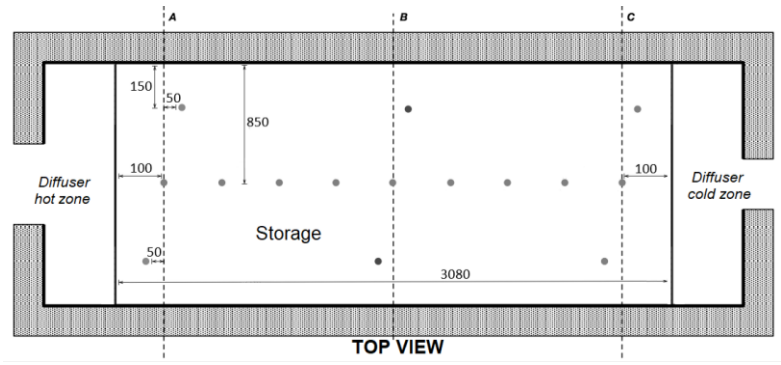

Figure 3: Plan de l'instrumentation

3. Indicateurs

L'énergie de charge, apportée par le canon, et de décharge, récupérée en sortie de stockage, sont calculées à l'aide de l'équation 1, où T est la température moyenne des thermocouples de la section A :

$$Q_{air-ch}(t) = \int_0^t \dot{m}(t)\left(\int_{T_{ext}}^{T_{ch}(t)} Cp_{air}(T)dT\right)dt \quad (1)$$

Le rendement est le ratio entre l'énergie déchargée et l'énergie chargée par le stockage :

$$\gamma(t) = \frac{Q_{air-d}(t)}{Q_{air-ch}(t_{end-ch})} \quad (2)$$

4. Modèle

Le stockage est assimilé à un milieu poreux et modélisé en 1D par 3 équations d'énergie couplées : une pour le fluide, une pour le solide et une pour la paroi [3] . La température des particules de bauxite est supposée uniforme (Bi=0,1) et les corrélations utilisées pour les coefficients de convection, conduction et rayonnement sont issues de *Esence et al.* [4].

$$\varepsilon(\rho c_p)_f\left(\frac{\partial T_f}{\partial t}+u\frac{\partial T_f}{\partial x}\right)=k_{feff}\frac{\partial {T_f}^2}{\partial x^2}+h_v\frac{A_{f\leftrightarrow s}}{(V_f+V_s)}(T_s-T_f)+h_w\frac{A_{f\leftrightarrow w}}{(V_f+V_s)}(T_w-T_f) \quad (3)$$

$$(1-\varepsilon)(\rho c_p)_s\frac{\partial T_s}{\partial t}=k_{seff}\frac{\partial {T_s}^2}{\partial x^2}+h_v\frac{A_{s\leftrightarrow f}}{(V_f+V_s)}(T_f-T_s)+h_w\frac{A_{s\leftrightarrow w}}{(V_f+V_s)}(T_w-T_s) \quad (4)$$

$$(\rho c_p)_w\frac{\partial T_w}{\partial t}=k_w\frac{\partial {T_w}^2}{\partial x^2}+h_w\left[\frac{A_{f\leftrightarrow w}}{V_w}(T_f-T_w)+\frac{A_{s\leftrightarrow w}}{V_w}(T_s-T_w)\right]+h_{ext}\frac{A_{w\leftrightarrow ext}}{V_w}(T_{ext}-T_w) \quad (5)$$

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Robustesse en température

Les variations de température des chaleurs fatales peuvent être brutales et de l'ordre de plusieurs centaines de degrés [5]. Le stockage est soumis à ces variations et est comparé à une charge de référence à une température de charge constante de 425°C. L'amortissement des variations est observé en fonction de la profondeur de lit. Le protocole consiste à alterner la température de charge entre 325 et 525°C toutes les 30 minutes jusqu'à la fin de charge, déterminée par une température en sortie de stockage de 190°C. Le débit de charge est de 0,58 $kg.s^{-1}$. La décharge est ensuite effectuée avec de l'air ambiant à 15°C et un débit de 0,65 $kg.s^{-1}$. La capacité du stockage à amortir les variations de températures peut être observée en traçant la température des thermocouples au sein du stockage (fig. 4). Pour chacune des courbes, l'abscisse (en mm) des thermocouples correspondants est indiquée.

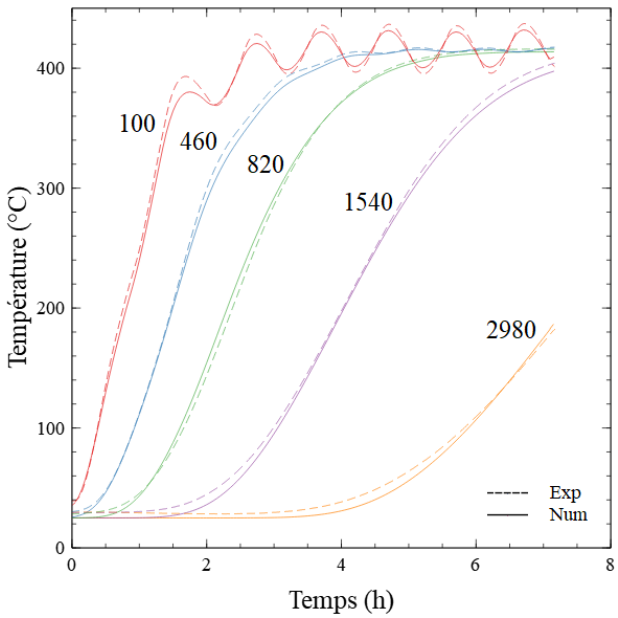

Figure 4 : Température des thermocouples pendant la charge

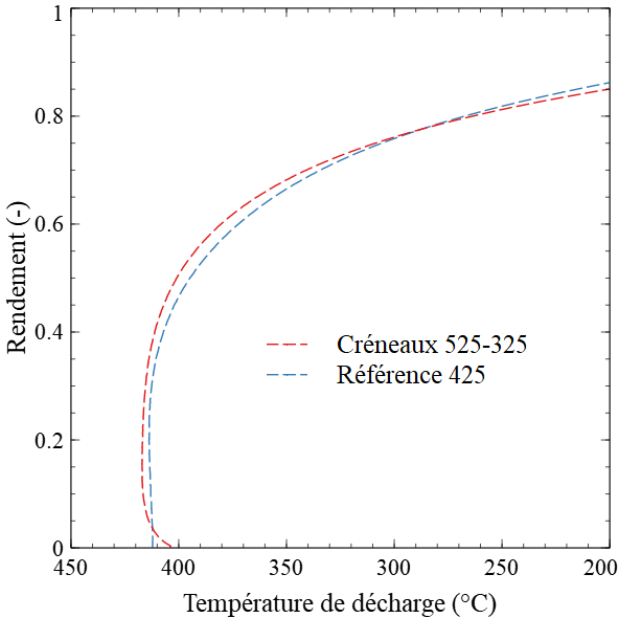

Figure 5 : Comparaison rendement entre essai créneaux et référence

L'inertie thermique du circuit aéraulique et de seulement 100 mm de lit de céramique ont permis de diviser l'amplitude des variations de la température d'entrée par 4, le thermocouple oscillant de seulement 50°C, autour d'une valeur moyenne de 425°C. Les variations sont très fortement amorties au bout de 460 mm de lit, position à laquelle la température du thermocouple n'oscille plus que de quelques degrés autour de 425°C, température moyenne d'entrée. Le modèle est capable de prédire ces variations avec un écart maximum de 3%, ce qui est du même ordre de grandeur que l'erreur de mesure (incertitude sur le positionnement des thermocouples). L'unité expérimentale et le modèle numérique présentent tous deux une robustesse vis-à-vis des variations de la température de gisement. Une faible couche du stockage agit donc comme tampon thermique vis-à-vis du gisement de chaleur.

Sur la figure 5, les rendements des essais « créneaux » et référence sont tracés en fonction de la température de décharge de l'unité, correspondant à un temps croissant. Pour chacun des essais, plus de 40% de l'énergie est restituée à une température constante de 425°C, qui est la température moyenne de charge. La température de décharge baisse ensuite, ce qui est dû à l'extraction de la thermocline de la cuve. Les deux essais ont un comportement identique, prouvant la capacité du stockage à amortir la variation de température de charge sans en affecter son rendement.

La figure 5 indique aussi qu'il est possible d'évaluer le rendement du stockage en fonction de la température de valorisation voulue. Il est ici de 76% pour 300°C et de 85% pour 200°C. Le rendement est, par conséquent, très dépendant de la température de valorisation qu'admet le procédé énergétique aval.

Le stockage thermique a permis de lisser le gisement « créneaux » à sa température moyenne et ce, sans dégradation de la thermocline vis-à-vis de l'essai témoin. Il peut donc transformer un gisement à température variable en une source de chaleur à température constante tant que la thermocline n'est pas extraite du stockage. Il est ainsi pertinent d'utiliser un stockage thermique lors de fortes variations de la température de chaleur fatale.

5.2. Robustesse en débit

Quatre essais ont été effectués pour déterminer l'impact des variations de débit sur la charge et sur la décharge. Les quatre essais ont été réalisés avec une température de charge de 525°C et une température seuil de charge à 170°C. Le tableau 1 indiquent les conditions opératoires choisies.

Tests	Référence	Décharge forte	Créneaux	Rampe
Débit charge ($kg.s^{-1}$)	0,58	0,58	0,29-0,58 (demi période 0,5h)	0,14 à 0,58
Débit décharge ($kg.s^{-1}$)	0,65	1,29	0,65	0,65

Tableau 1 : *Conditions opératoires des essais*

Lors de l'essai « Rampe », le débit a été augmenté linéairement de 0,14 à 0,58 $kg.s^{-1}$ entre 0 et 4h, puis a été maintenu à un palier de 0,58 $kg.s^{-1}$ jusqu'à la fin de la charge.

Les rendements sont présentés pour une température seuil de décharge de 420°C. A l'exception de la rampe, l'ensemble des essais a donné des rendements compris entre 71 et 73,5 %. Le rendement est donc peu affecté par le débit sur la plage de 0,29 à 1,29 $kg.s^{-1}$. Sur l'essai « Rampe », le rendement a chuté de 6 %. Le début de la charge a été effectué à 0,14 $kg.s^{-1}$, ce qui a réduit les échanges convectifs forcés et favorisé une diffusion de la chaleur. La zone de thermocline a donc augmenté ce qui a dégradé les performances thermiques de l'unité.

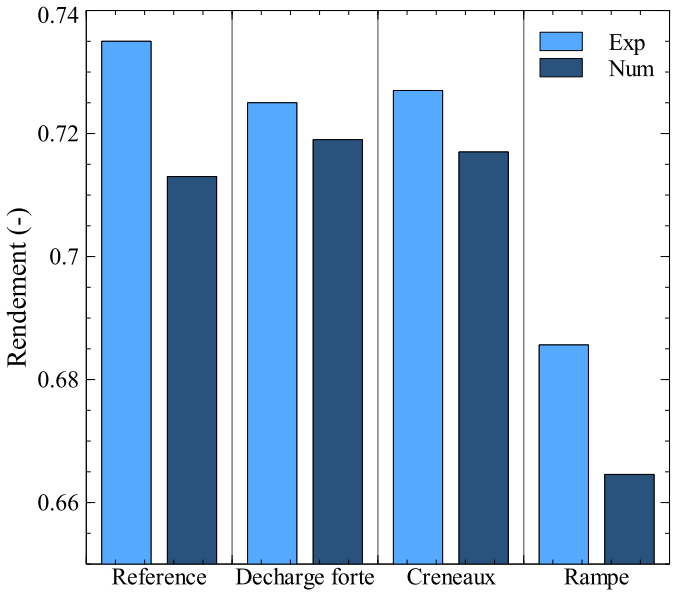

Figure 6 : Rendements expérimentaux et numériques des essais de robustesse aux variations de débit

Le modèle présente moins de 3 % d'erreur avec les résultats expérimentaux. Celui-ci peut donc être utilisé pour modéliser de fortes variations de gisement en entrée de stockage. Le modèle est ainsi validé de 0,14 à 1,29 $kg.s^{-1}$. Le stockage est adapté à plusieurs débits et donc à plusieurs types de gisement.

5.3. Influence des périodes de stand-by

La chaleur fatale peut aussi être intermittente avec des périodes d'arrêt due à une maintenance technique. Un essai concernant la robustesse vis-à-vis des périodes de stand-by a donc été réalisé. La température de charge a été de 525°C, à 0,58 kg.s^{-1} pendant 3h20, puis une période d'arrêt de 6h20 a été imposée avant de poursuivre la charge dans les mêmes conditions opératoires. La décharge s'est effectuée à 1,29 kg.s^{-1}. Un essai référence à 525°C et 0,58 kg.s^{-1} a été réalisé sans période de stand-by pour comparaison. Le profil de température selon l'axe du lit est tracé sur la figure 7.

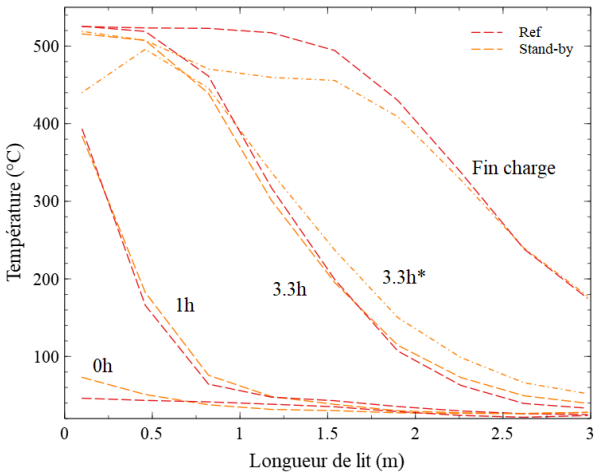

Figure 7 : Profils de températures témoin et avec stand-by durant la charge

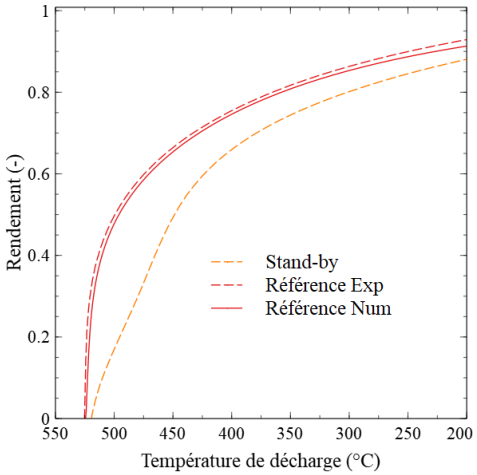

Figure 8 : Comparaison rendement entre essai référence et stand-by

Les profils de température sont identiques à 3h20 pour les deux essais puisqu'il s'agit des mêmes conditions opératoires. Après la période de stand-by, deux phénomènes sont visibles. Une dé-stratification thermique s'est produite avec une thermocline dont la pente est moins prononcée que précédemment. L'autre phénomène se situe côté chaud du stockage, où se trouvent des pertes thermiques, probablement parce que la vanne n'a pas été fermée lors du stand-by.

L'impact de ces deux phénomènes peut être quantifié grâce aux rendements tracés sur la figure 8. La simulation de la période de stand-by n'a pas été réalisée car les phénomènes de convection naturelle ne peuvent être pris en compte à l'aide du modèle en 1 dimension proposé dans cette étude. La figure 8 montre l'accroissement du rendement en fonction de la température de décharge, correspondant à un temps croissant. Le comportement de l'essai de référence est similaire à ce qui est observé à la figure 5. Le rendement augmente d'abord à température de décharge constante. Il continue de croître alors que le stockage se refroidit, et que la température de décharge baisse pour atteindre 93 % pour une température de consigne de 200°C. En revanche, la chaleur de l'essai « stand-by » n'est pas déchargée à température constante, probablement à cause des pertes thermiques de la période de stand-by. En effet, les pertes thermiques ont lieu du côté chaud du stockage. Ces pertes viennent perturber la zone de thermocline, qui s'étend alors à tout le stockage. Ainsi, l'énergie thermique ne peut plus être déchargée à 525°C (température de charge) comme sur l'essai de référence. Pour une température seuil de décharge fixée à 450°C, le rendement est près de 20 % inférieur à l'essai de référence. La chaleur haute température a donc été dégradée. En revanche, pour une température de décharge plus faible, 200°C, la différence de rendement énergétique n'est plus que de 5 %. Le stockage a donc été capable de restituer 87 % de la chaleur a une température

supérieure à 200°C. La chaleur déchargée a cependant une température plus faible, et donc une exergie moins importante, ce qui fait apparaître un compromis entre la quantité de chaleur valorisée et sa qualité.

6. Conclusion

Cette étude présente le comportement d'un module de stockage destiné à valoriser la chaleur fatale rejetée par les sites industriels. Compte tenu des fortes intermittences et du déphasage avec les besoins des gisements de chaleur fatale, il est nécessaire d'implanter un moyen de stockage qui devra avoir pour objectifs, entre autres, d'amortir efficacement les fluctuations. La robustesse d'utilisation de l'Eco-Stock est montrée en le soumettant à trois types de contraintes : variation de la température de charge, variation du débit et stand-by entre deux périodes de charge. Le stockage thermique a permis de filtrer le profil de température autour de sa température moyenne, permettant de valoriser une grande partie de la chaleur. L'étude montre que le stockage a la capacité d'accepter des contraintes de variation de débits et de stand-by avec une baisse de rendement d'au maximum 5 % comparé aux essais de références. L'énergie restituée a un contenu exergétique moindre, mais résulte d'un compromis entre quantité d'énergie valorisée et sa qualité. Compte tenu de ses caractéristiques, ce stockage thermique se révèle très intéressant pour la valorisation de chaleurs fatales, mais aussi pour des applications solaires ou encore le stockage d'électricité par compression d'air adiabatique. Les travaux futurs porteront sur la modélisation de la chaîne entière de procédés industriels intégrant le stockage.

Références

[1] U.S. Department of Energy, "Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry.," 2008.

[2] N. Lopez Ferber *et al.*, "Flexibility and robustness of a high-temperature air/ceramic thermocline heat storage pilot," *J. Energy Storage*, vol. 21, no. November 2018, pp. 393–404, 2019.

[3] J. F. Hoffmann, T. Fasquelle, V. Goetz, and X. Py, "Experimental and numerical investigation of a thermocline thermal energy storage tank," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114, pp. 896–904, 2017.

[4] T. Esence, A. Bruch, S. Molina, B. Stutz, and J. F. Fourmigué, "A review on experience feedback and numerical modeling of packed-bed thermal energy storage systems," *Sol. Energy*, vol. 153, pp. 628–654, 2017.

[5] T. Keplinger, M. Haider, T. Steinparzer, A. Patrejko, P. Trunner, and M. Haselgrübler, "Dynamic simulation of an electric arc furnace waste heat recovery system for steam production," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 135, no. January, pp. 188–196, 2018.

Remerciements

Ces travaux ont été financés par la Banque Publique d'investissement via le Concours Mondial de l'Innovation remporté par Eco-Tech Ceram et dans le cadre du labEx SOLSTICE (ANR-10-LABX-22-01-SOLSTICE).