

Stockage électrothermique en chaleur latente par matrice conductrice issue des copeaux métalliques recyclés : vers une approche circulaire de la décarbonation de l'industrie.

Electrothermal storage of latent heat using a conductive matrix made from recycled metal chips: towards a circular approach to industrial decarbonization.

Merveil IRAGI^{1,3}, Xavier PY², Elissa EL RASSY², Jérôme SOTO², Frédéric LONTSI⁴

¹Laboratoire de thermique et énergie de Nantes, Nantes Université, CNRS,
La chantrerie, rue Christian Pauc, 44300 Nantes, France

²Faculté d'ingénierie ULC-Icam, Université Loyola du Congo, Kimwenza Mission, Kinshasa, RDC

³Icam Ouest, 35 av. champ des manœuvres, 44470 Carquefou, Carquefou, France

⁴Institut Ucac-Icam, Université Catholique d'Afrique centrale, 5504 Akwa, Douala, Cameroun

*(auteur correspondant : merveil.iragi@univ-nantes.fr)

Résumé

Cette étude concerne un concept de stockage de chaleur latente à conversion électrothermique directe, destiné aux applications industrielles type « Power-to-heat ». Le système repose sur l'intégration d'une matrice conductrice issue de copeaux métalliques recyclés au sein d'une paraffine RT70HC. La charge est faite par effet Joule in-situ, permettant une génération volumique de chaleur. Les résultats expérimentaux montrent une fusion homogène, des temps de charge fortement réduits, d'un facteur 4, par rapport à la fusion avec fluide caloporteur et une stabilité thermique du MCP après 25 cycles.

Abstract

This study is dedicated to a latent heat thermal energy storage concept based on direct in-situ electrothermal conversion for power-to-heat applications. A conductive matrix made from recycled metallic chips is embedded within RT70HC paraffin, enabling Joule heating directly inside the storage medium. Experimental results demonstrate homogeneous temperature distribution and significantly accelerated melting by factor 4 compared to charge with conventional heat transfer fluid. Repeated electrothermal cycling up to 25 cycles confirms the thermal and chemical stability of the PCM.

Nomenclature

C_p	capacité de chaleur spécifique, J/(kg.K)	Q	énergie, J
h	hauteur, m	R	résistance électrique, Ω
I	courant électrique (intensité), A	t	temps, s ou h
U	tension, V	T	température, $^{\circ}\text{C}$
e	épaisseur, m	P	puissance, W
d	diamètre, m	H	enthalpie, J/kg
m	masse, kg		<i>Symboles grecs</i>

ρ masse volumique, kg/m³
 η rendement

Φ_{perte} perte thermique, W
 λ conductivité thermique, W/(m.K)

1. Introduction

La décarbonation du secteur industriel constitue un enjeu majeur de la transition énergétique, ce secteur représentant près de 20% des émissions directes de CO₂ en Europe [1]. Une part significative de ces émissions est liée à la production de chaleur de procédé, majoritairement assurée par des combustibles fossiles [2]. Dans ce contexte, l'électrification des usages thermiques, couplée à une intégration accrue des énergies renouvelables variables (ERV), apparaît comme un levier central de la décarbonation [3].

Toutefois, la forte pénétration des ERV pose des défis croissants en matière de flexibilité des systèmes énergétiques, caractérisés par des épisodes de surplus de production et de prix négatifs sur les marchés électriques [4]. Les technologies type « Power-to-heat » (P2H) permettent de convertir ces excédents électriques en chaleur valorisable, en particulier dans l'industrie [5]. Leur déploiement à grande échelle nécessite cependant des solutions de stockage thermique performantes, capables de dissocier temporellement production électrique et demande thermique [6].

Le stockage thermique par chaleur latente (ST-CL), basé sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP), présente une densité énergétique élevée et une température quasi constante lors des transitions de phase [7]. Néanmoins, les faibles conductivités thermiques intrinsèques des MCPs organiques limitent les puissances de charge et de décharge [8]. De nombreux travaux ont ainsi exploré l'intégration des structures conductrices (mousses métalliques, ailettes, matrices graphite) afin d'améliorer les transferts thermiques [9][10].

Plus récemment, le concept de conversion électrothermique in-situ a émergé comme une alternative prometteuse aux schémas de charge indirects, en permettant la conversion directe de l'électricité en chaleur au cœur du matériau de stockage par effet Joule [11]. Cependant, les MCPs, intrinsèquement isolants sur le plan électrique, ne permettent pas la génération de la chaleur par effet Joule ; il est donc nécessaire d'y intégrer des matrices conductrices afin de rendre possible la conversion électrothermique in-situ. Parallèlement, les stratégies de décarbonation industrielle s'orientent vers une meilleure valorisation des ressources secondaires, notamment les rebuts métalliques, considérés comme des matériaux stratégiques dans une logique d'économie circulaire [12]. Des entreprises telles que ArcelorMittal Recycling, Sims Metal... présentes dans le secteur du recyclage de ces rebuts démontrent de la disponibilité d'un gisement mobilisable pour les applications énergétiques innovantes [13].

Dans ce contexte, le présent travail propose une approche originale de stockage électrothermique à chaleur latente intégrant une matrice conductrice issue des copeaux métalliques recyclés. L'objectif est de démontrer la faisabilité du chargement électrothermique in-situ, d'en évaluer les performances thermiques et d'analyser la stabilité du composite sous cycles répétés [14], en vue d'applications industrielles type « Power-to-Heat » à faible empreinte carbone.

2. Matériaux et méthodes

2.1. Elaboration du composite MCP-matrice conductrice

Le matériau de stockage thermique est composé de la paraffine commerciale RT70HC et d'une matrice conductrice constituée de copeaux d'acier inoxydable (AISI 304) issus de rebuts

métallurgiques d'usinage, préalablement nettoyés. Le mélange est fait de 78% en masse de paraffine (représentant une fraction volumique de 97%) et 22% en masse d'acier inox (représentant une fraction volumique de 3%).

Les copeaux sont incorporés dans la paraffine préalablement fondue afin d'obtenir un composite homogène, assurant à la fois une percolation thermique et électrique. Cette approche permet d'améliorer la conductivité effective du matériau tout en conférant des propriétés de conduction électrique nécessaires à la conversion électrothermique.

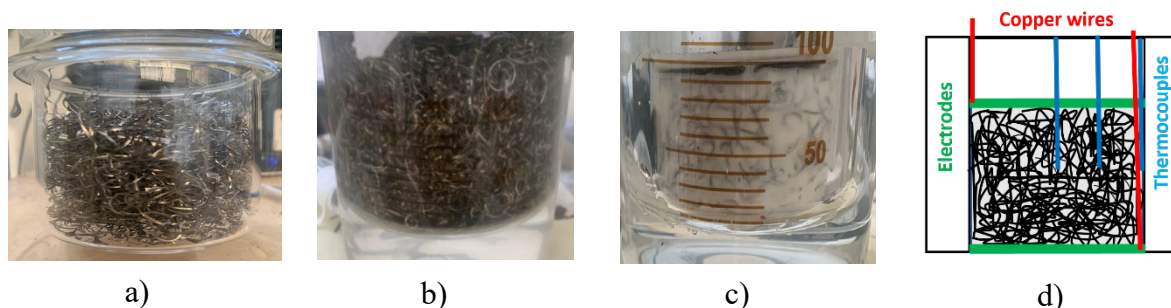


Figure 1 : Montage de l'unité de stockage

- a) Lit de copeaux d'acier inox, b) matériau composite (paraffine à l'état liquide),
c) matériau composite (paraffine à l'état solide), d) Structure interne 2D de l'unité de stockage

La Figure 1.a présente les copeaux d'acier inox entassés dans le récipient en pyrex avant d'y mélanger la paraffine liquide, la Figure 1.b montre le matériau composite une fois constitué, la paraffine étant à l'état liquide et transparente. La Figure 1.c montre également le matériau, la paraffine étant à l'état solide et la Figure 1.d une coupe 2D montrant les fils électriques connectés aux électrodes placées en haut et en bas du matériau composite et les thermocouples de type K disposés à mi-hauteur, au centre (T1), à mi-rayon (T2) et au bout du rayon (T3), afin de suivre l'homogénéité thermique durant les phases de charge et décharge. Les propriétés du matériau sont présentées dans le Tableau 1.

Propriétés	Valeurs	
	Paraffine RT70HC	Acier inox
Capacité de chaleur spécifique	2 000 J/(kg.K)	475 J/(kg.K)
Chaleur latente	260 000 J/kg	
Masse volumique	900 kg/m ³ (état solide à 15°C), 800 kg/m ³ (état liquide à 80°C)	7850 kg/m ³ (à 20°C)
Conductivité thermique	0.2 W/(m.K)	16.3 W/(m.K) (entre 80°C et 100°C)
Résistivité électrique	Isolant électrique	7.74 10 ⁻⁷ Ω/m

Tableau 1 : Propriétés principales de la paraffine RT70HC (données de Rubitherm) et de l'acier inoxydable (rapport nasa)

2.1.1. Dispositif expérimental de charge électrothermique

La charge du système est réalisée par alimentation électrique continue (20V-20A), appliquée à la matrice métallique immergée dans le MCP via deux électrodes métalliques mises en œuvre

sous forme de disques (Figure 1). L'effet Joule génère une dissipation volumique de chaleur au sein du composite, également homogénéisée par la conduction thermique de la matrice métallique, conduisant à la fusion progressive de la paraffine.

La température est mesurée par des thermocouples de type K, voir Figure 1.d. Le matériau composite est contenu dans un récipient cylindrique ($h=0.19\text{m}$, $D_i=0.06\text{m}$ et $D_{ex}=0.09\text{m}$) à double paroi en pyrex, ce qui permet de faire circuler de l'eau dans celui-ci pour la décharge à l'aide du bain thermostaté. Le schéma du dispositif expérimental est présenté sur la Figure 2 :

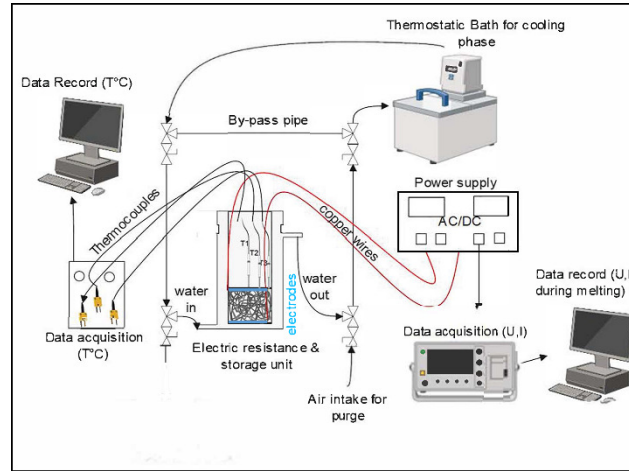


Figure 2 : Dispositif expérimental de charge et décharge

3. Résultats et discussion

3.1. Performances de charge électrothermique

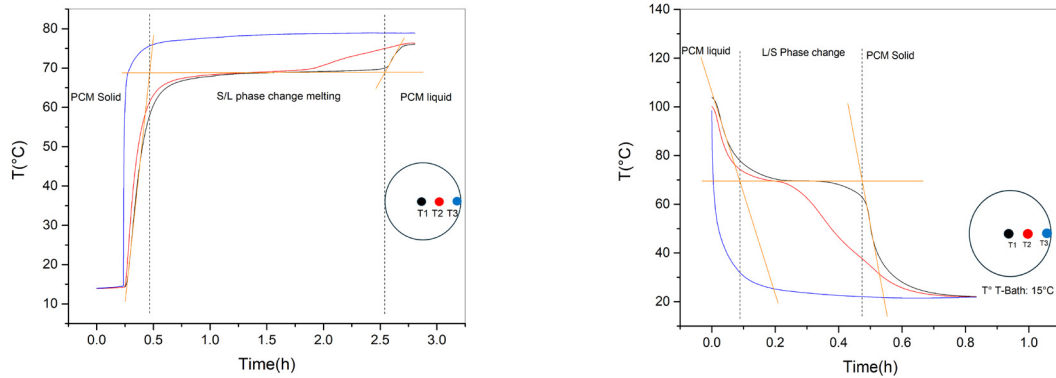


Figure 3 : Evolution temporelle de la température pour les phases charge et décharge avec fluide caloporteur

(a) charge avec fluide caloporteur à 80°C

(b) décharge avec fluide caloporteur à 15°C .

Les figures 3.a et 3.b présentent les cycles de charge et décharge, respectivement, du matériau composite avec le fluide caloporteur, la charge étant faite à 80°C et la décharge à 15°C . Un gradient de température cohérent est observé entre les différents thermocouples. Le plateau de changement de phase dure environ 2h lors de la charge avec le fluide caloporteur et pratiquement 0.4 h pour la décharge.

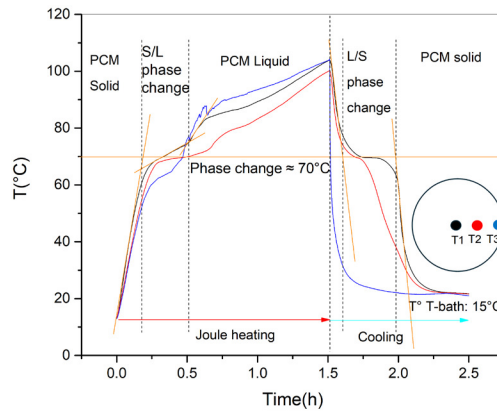


Figure 4 : 1er cycle charge électrothermique et décharge avec fluide caloporteur

La Figure 4 présente un cycle de charge électrothermique in-situ par effet Joule du composite RT70HC/acier inox et la décharge par fluide caloporteur. Le temps de charge est réduit d'un facteur 4 par rapport à un chauffage indirect par fluide caloporteur (Figure 3.a), passant de 2h à environ 0,5h pour une énergie stockée équivalente. Cette amélioration est attribuée à la génération volumique de chaleur et à la conductivité thermique accrue du composite.

3.2. Stabilité thermique et cyclabilité

La charge électrothermique étant non-conventionnelle, le MCP pourrait être dégradé par la présence des points chauds et/ou par effet électrochimique. Il est donc important de vérifier que les propriétés (en particulier chaleur latente) sont conservées au cours des cycles. Dans un premier temps, la longueur des plateaux de solidification calculée à chaque cycle a été tracée en fonction des nombres de cycle sur la Figure 5.a. On observe que le plateau de solidification reste constant sur les cycles opérés permettant d'affirmer qu'il n'y a pas eu de forte dégradation de la paraffine et que celle-ci a conservé sa chaleur latente tout au long de ces cycles.

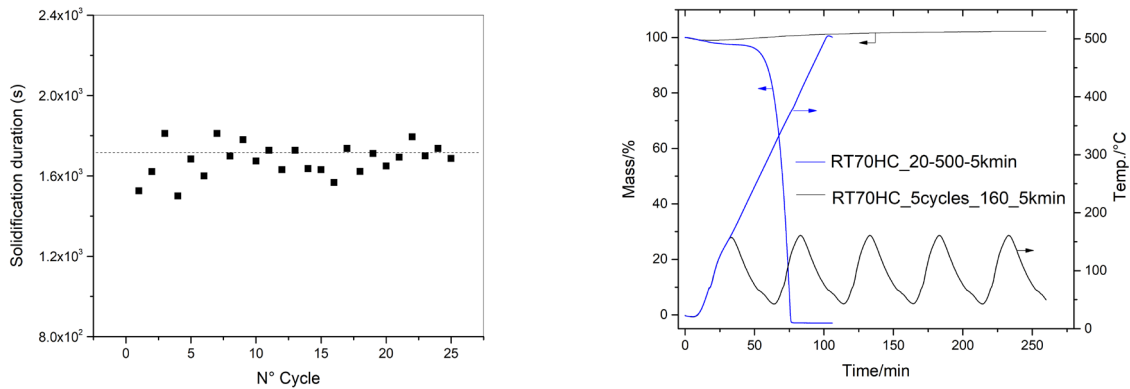


Figure 5 : Plateau de solidification et analyse thermogravimétrique (ATG)

(a) Longueur de plateau en mesurant la durée de solidification par cycle

(b) Evolution de la masse d'un échantillon de paraffine RT70HC

La stabilité thermique du RT70HC a été également étudié avec une analyse thermogravimétrique (ATG). Les résultats présentés dans la Figure 5.b démontrent que la

paraffine a une faible perte en masse jusqu'à 250°C et est totalement décomposée à 350°C. Les cycles thermiques entre la température ambiante et 160°C ont été effectués sur une paraffine brute, pas encore cyclée sous la charge électrothermique afin d'étudier une possible dégradation sous des cycles cumulés dans la même gamme de températures que nos cycles précédents. Une légère dégradation a été constaté.

Des analyses par calorimètre différentiel à balayage (DSC) ont également été effectuées pour identifier une possible dégradation de la paraffine. Ces analyses réalisées, après 25 cycles ne montrent aucune variation significative de l'enthalpie de fusion ni de la température de transition.

Bien que les mesures macroscopiques (thermocouples) et DSC n'indiquent pas de points chauds significatifs, il est possible que des variations locales du champ électrique dans le réseau percolant puissent exister à l'échelle microscopique, en fonction de la distribution des contacts entre copeaux résultant de la compression manuelle faite lors de la procédure expérimentale.

3.3. Bilan énergétique et efficacité du système

Concernant le bilan énergétique, l'énergie électrique cumulée fournie au système pendant la durée de la charge a été calculée et est exprimée selon l'expression suivante :

$$Q_{fournie}(t) = \int_0^t R_{corr}(t) \cdot I^2 dt \quad (1)$$

où R_{corr} est la résistance électrique corrigée en supprimant la résistance des fils électriques et des électrodes, et I la valeur du courant électrique fixée par l'alimentation continue, ($I=20.2$ A).

L'énergie stockée dans le système lors de la charge et l'énergie récupérée lors de la décharge (sans considérer les pertes), sont estimées en tenant compte des chaleurs sensibles et latentes des différents composants :

$$Q_s = (m \cdot C_p \Delta T)_{sol} + m \cdot L + (m \cdot C_p \Delta T)_{liq} + (\sum (m \cdot C_p)_{ac,el,py}) \Delta T \quad (2)$$

$$Q_r = (m \cdot C_p \Delta T)_{liq} + m \cdot L + (m \cdot C_p \Delta T)_{sol} + (\sum (m \cdot C_p)_{ac,el,py}) \Delta T \quad (3)$$

où les indices « sol » et « liq » correspondent aux phases solides et liquides, respectivement et « ac », « el », « py », sont l'acier inox, les électrodes et le récipient en pyrex.

Les pertes thermiques ont été également calculées en estimant une résistance globale composée de 4 résistances thermiques en séries : la conduction dans les parois intérieures et extérieures du pyrex, la conduction dans l'air à l'état stationnaire dans la double paroi et la convection naturelle entre l'air et la paroi extérieure du récipient en pyrex. L'expression utilisée est exprimée ci-dessous :

$$\dot{Q}_p = \frac{T_i - T_{\infty}}{R_{tot}} \quad (4)$$

$$\text{Avec : } R_{tot} = R_{cond,paroi 1} + R_{cond,paroi 2} + R_{cond,air} + R_{conv,air ext} \quad (5)$$

Résistances	Conduction paroi intérieure	Conduction paroi extérieure	Conduction air double paroi	Convection naturelle extérieur	Total air
Valeur (K/W)	0.07	0.05	10.8	1.76	12.7
%	0.55	0.4	85	14	

Tableau 1 Résistances thermiques estimées

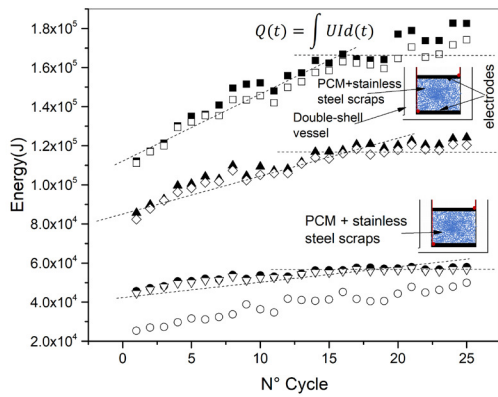


Figure 6 : Bilan énergétique du système par cycle

Energie stockée ■ , énergie stockée+ pertes □
 Energie stockée/rendue par tout le système ▲/◇
 Energie stockée/rendue par le matériau ●/▽
 Pertes thermiques ○

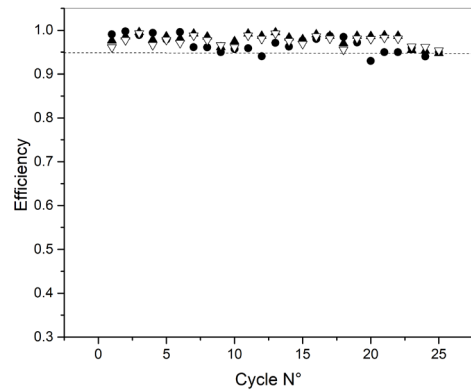


Figure 7 : Efficacité de charge et décharge du système par cycle

(Energie stockée+pertes) /énergie stockée ●
 Energie rendue/énergie stockée (par le matériau)▲
 Energie rendue/énergie stockée (par le système)▽

La superposition des courbes des énergies stockées et restituées par le matériau composite et par le système confirme la réversibilité du changement de phase de la paraffine RT70HC et la stabilité du réseau conducteur métallique. L'évolution progressive de l'énergie injectée au cours des cycles est cohérente avec la légère augmentation puis la stabilisation de la résistance électrique du composite après environ 20 cycles. Cette stabilisation de la résistance observée au cours des cycles peut être interprétée comme une réorganisation microstructurale conduisant à un réseau de conduction plus homogène. Les pertes thermiques, proportionnelles à l'énergie fournie par effet Joule, représentent environ 24-25% de l'énergie injectée. Le parfait alignement entre l'énergie fournie et la somme de l'énergie stockée et des pertes valide le bouclage du bilan thermique. Les efficacités de charge et décharge, comprises entre 97 à 99%, confirment la capacité du système à restituer quasi intégralement l'énergie stockée.

4. Conclusion

La faisabilité d'un concept de charge et de stockage thermique à chaleur latente par conversion électrothermique directe par effet Joule est démontrée dans cette étude. L'intégration d'une matrice conductrice élaborée à partir des copeaux métalliques recyclés au sein d'une paraffine RT70HC permet une charge in-situ efficace, dans laquelle le matériau de stockage joue simultanément le rôle d'élément chauffant et de réservoir de chaleur latente.

Les résultats expérimentaux confirment que les copeaux métalliques forment des chemins de percolation efficaces, assurant une conduction électrique homogène, des champs de température uniformes et une fusion accélérée du MCP d'un facteur 4 comparativement avec la charge par fluide caloporteur. Les essais de cyclage montrent par ailleurs que la paraffine RT70HC conserve ses propriétés de stockage après 25 cycles de fusion-solidification jusqu'à 160°C, sans dégradation observable, validant la robustesse du composite électrothermique.

Ce système ouvre la voie à des architectures type « Power-to-Heat » simplifiées, potentiellement plus compactes et à plus forte densité de puissance. En combinant stockage latent, conversion électrothermique in-situ et valorisation d'énergies renouvelables variables et

de ressources métalliques recyclées, cette approche s'inscrit pleinement dans une stratégie de décarbonation et d'économie circulaire des procédés industriels.

Références

- [1] ADEME, Chiffres clés du climat – France, Europe et Monde (Édition 2022). *Agence de la transition écologique*, (2022).
- [2] IPCC, Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change (AR6 Working Group III). *Cambridge University Press*, (2022).
- [3] International Energy Agency, World Energy Outlook, (2023), <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>
- [4] H.K. Jacobsen, S.T. Schroder, Curtailment of renewable generation: Economic optimality and incentives, *Energy Policy*, 63 (2012), 663–675, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.07.004>
- [5] A. Bloess, W. P. Schill, A. Zerrahn, Power-to-heat for renewable energy integration: A review of technologies, modeling approaches, and flexibility potentials, *Applied Energy*, 212 (2018), 1611–1626, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.12.073>
- [6] D. P. Lund, J. Lindgren, J. Mikkola, J. Salpakari, Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45 (2015), 785–807, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.057>
- [7] T. Nomura, N. Okinaka, T. Akiyama, Technology of latent heat storage for high temperature application: A review, *ISIJ International*, 50 (9) (2010), 1229–1239, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.50.1229>
- [8] B. Atakan, J. Qureshi, Heat flux in latent thermal energy storage systems: The influence of fins, thermal conductivity and driving temperature difference. *Heat and Mass Transfer*, 58 (2022), 2085–2096. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03220-3>
- [9] X. Py, R. Olives, S. Mauran, Paraffin/porous-graphite-matrix composite as a high and constant power thermal storage material, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (14) (2001), 2727–2737, [PII: S0017-9310\(00\)00309-4](https://doi.org/10.1006/j.ijhmt.2001.0039)
- [10] M. M. El Idi, M. Karkri, M. Kraiem, Preparation and effective thermal conductivity of a Paraffin/ Metal Foam composite. *Journal of Energy Storage*, 33 (2021), 102077. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102077>
- [11] A. M. Pantaleo, S. Trevisan, F. Matteucci, L.F. Cabeza, Innovation trends on high-temperature thermal energy storage to defossilize energy systems, *Journal of Energy Storage*, 103 (2024), 114261, <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114261>
- [12] P. Klimek, M. Hess, M. Gerschberger, S. Thurner, Circular transformation of the European steel industry renders scrap metal a strategic resource, *arXiv* (2024), <http://arxiv.org/abs/2406.12098>
- [13] NDC Partnership, Policy Brief: The potential of scrap use for EU steel decarbonization,(2024), [20240909_NDCA-PB_The role of scrap for EU steel decarbonization_SO_ATö.pdf](https://www.ndcpartnership.org/publications/20240909_NDCA-PB_The_role_of_scrap_for_EU_steel_decarbonization_SO_ATö.pdf)
- [14] A. Wadee, P. Walker, N. McCullen, V. Ferrandiz-Mas, The effect of thermal cycling on the thermal and chemical stability of paraffin PCM composites. *Materials and Structures*, 58 (2025), 25. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02556-y>

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au projet PeA-CIPASTI financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et l'Agence Française de Développement (AFD). Ce travail a également bénéficié d'une aide de l'État gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre de France 2030 portant la référence « ANR-22-PESP-0005 ».