

Stockage thermique latent pour la récupération de chaleur fatale (120 - 150°C) : stabilité des matériaux

Latent thermal energy storage system for waste heat recovery (120 - 150°C): materials stability

Yasmine LALAU^{1*}, Didier HAILLOT², Sacha RIGAL¹, Jean-Pierre BEDECARRATS¹

¹ Université de Pau et des Pays de l'Adour, E2S UPPA, LaTEP Laboratoire de Thermique, Énergétique et Procédés, IPRA, Pau, France

² École de Technologie Supérieure, Département de génie mécanique, 1100, rue Notre-Dame Ouest, Montréal, H3C1K3, Canada

* auteur correspondant : yasmine.lalau@univ-pau.fr

Résumé – L'industrie européenne consomme plus de la moitié de son énergie sous forme de chaleur (~1800 TWh.an⁻¹) dont une partie est perdue lors du fonctionnement des procédés. La récupération et la valorisation de cette chaleur dite fatale permet de fournir une chaleur à empreinte CO_{2eq} nulle et de réduire les coûts de production. L'industrie manque de solutions rentables et robustes pour valoriser la chaleur fatale entre 100 et 200°C, en adéquation aux besoins de consommations. Dans cet objectif, un système de stockage d'énergie par chaleur latente est envisagé entre 120 et 150°C, nécessitant des matériaux présentant des performances thermiques élevées et stables dans le temps ainsi qu'un coût abordable. Cette communication expose les critères de sélection d'un panel de matériaux ayant abouti à la caractérisation et à l'étude du vieillissement de deux candidats prometteurs.

Mots-clés : Stockage thermique ; Matériaux à changement de phase (MCP) ; Vieillesse ; Chaleur fatale ; Efficacité énergétique.

Abstract – Thermal energy represents more than half of energy needs in European industry, but still misspend in processes as waste heat mostly between 100 and 200°C. Waste heat recovery and valorization provide carbon-free heat and reduce the production costs. The industrial sector is seeking for affordable and rugged solutions that should adapt the heat valorization to heat demand. This study aims at identifying suitable latent heat materials to reach that objective: the selected candidates should show good thermal performances that remain stable after aging and reasonable price. This communication details the selection process and aging results for two promising PCM.

Keywords: Thermal storage; Phase Change Materials (PCM); Aging; Waste heat; Energy efficiency.

Nomenclature

ρ masse volumique, kg.m⁻³
 ΔH chaleur latente, kJ.kg⁻¹
 T température, °C
 T_{fusion} température de fusion, °C

T_{onset} approximation graphique de T_{fusion} , °C
 $T_{1\%}$ seuil de perte de masse de 1%, °C
 ΔT_{moy} écart moyen entre les températures de fusion et de cristallisation, °C

1. Introduction

L'industrie française représente 19 % de la consommation nationale d'énergie finale, soit environ 300 TWh/an issus à 60% de combustibles fossiles, essentiellement importés [1]. La maîtrise de cette consommation présente de forts enjeux économiques, environnementaux, et en termes de sécurité énergétique. L'efficacité énergétique est un vecteur majeur de réduction des consommations, dont un des leviers est la récupération des chaleurs perdues dans les

procédés thermiques. Le potentiel français de ces chaleurs dites fatales est de 110 TWh, dont environ la moitié est perdue à plus de 100°C [1], et principalement en-dessous de 200°C [2].

L'industrie manque de solutions rentables et robustes pour valoriser la chaleur fatale dans cette gamme de température, en adéquation aux besoins de consommations qui peuvent être déphasés par rapport aux pertes [3]. L'une des voies possibles est la récupération de ces flux thermiques via un stockage thermique contenant des matériaux à changement de phase [4]. Les deux atouts principaux de cette technologie sont : (1) sa haute densité énergétique, facilitant l'intégration du système dans un environnement industriel complexe ; (2) la température relativement constante fournie, évitant les perturbations des procédés en aval [5].

Dans cet objectif, un système de stockage d'énergie par chaleur latente est envisagé entre 120 et 150°C, nécessitant des matériaux présentant des performances thermiques élevées et stables dans le temps ainsi qu'un coût abordable. Cette communication expose les critères de sélection d'un panel de matériaux ayant abouti à la caractérisation et à l'étude du vieillissement de deux candidats prometteurs.

2. Sélection des matériaux candidats pour un stockage dans la gamme 120-150°C

Le premier critère pour choisir le matériau à changement de phase adapté à l'application visée est sa température de transition T_{fusion} , qui doit se situer ici dans la gamme 120-150°C. De plus, les critères du Tableau 1 doivent être pris en compte [6][7].

Physiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une haute variation d'enthalpie volumique (chaleur latente et densité importantes) permettant de fournir un stockage de haute densité énergétique, au-delà d'un seuil fixé à 50 kWh.m⁻³ (~variation d'enthalpie de l'eau pour une variation de température de 43°C) ; ✓ Une haute conductivité thermique permettant d'intensifier les transferts de chaleur et d'augmenter la puissance de charge/décharge (information peu accessible) ; ✓ Un bon équilibre de phase, évitant une ségrégation défavorable au transfert de chaleur ; ✓ Pas ou peu de surfusion qui retarde la cristallisation.
Chimiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Une stabilité chimique à long terme pour éviter la dégradation des performances lors des cyclages thermiques ; ✓ Une compatibilité avec la matière en contact afin d'éviter la corrosion ; ✓ Pas de toxicité et de risque d'incendie.
Economiques	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Le matériau doit être disponible en quantités industrielles ; ✓ Le coût du système doit être adapté à son utilisation : pour un stockage court terme (~3 cycles par jours), l'International Renewable Energy Agency estime un investissement viable en-dessous de 225 €.kWh⁻¹ [8]. En comptant environ 45% de cet investissement pour le MCP [9], son coût doit rester inférieur à 100 €.kWh⁻¹ comme ordre de grandeur.

Tableau 1 : Critères de sélection d'un matériau de stockage

Le Tableau 2 répertorie les MCP organiques recensés dans littérature dont T_{fusion} se situe dans la gamme visée. Sont également précisées leur masse volumique ρ , leur chaleur latente ΔH_{fusion} , et la variation d'enthalpie volumique. La gamme de prix des matériaux est estimée à partir de cette dernière, et classée de la manière suivante : <50 €.kWh⁻¹ (+ + +), <100 €.kWh⁻¹ (+ +), <150 €.kWh⁻¹ (+), <500 €.kWh⁻¹ (-), < 1000 €.kWh⁻¹ (- -), >1000 €.kWh⁻¹ (- - -).

Trois catégories de matériaux à changement de phase ont été écartées :

- Les métaux, de par leur coût trop élevé. Deux MCP se situent dans la gamme de température [10] : l'Indalloy 255 et 281, avec des températures de fusion respectives de 125°C et 138°C.

- Les eutectiques, de par leur complexité de fabrication industrielle et l'incertitude d'obtenir réellement l'eutectique souhaité. Cinq MCP auraient pu satisfaire le critère T_{fusion} [11][12] : 30% mLiNO₃+18% mNaNO₃+52% mKNO₃ ($T_{\text{fusion}}=120^{\circ}\text{C}$), 33% mLiNO₃+67% mKNO₃ ($T_{\text{fusion}}=125^{\circ}\text{C}$), 38,2% mLiNO₃+61,8% mCO(NH₂)₂ ($T_{\text{fusion}}=125^{\circ}\text{C}$, instabilité thermique), 44% mCa(NO₃)₂+44% mNaNO₃+12% mKNO₃ ($T_{\text{fusion}}=140^{\circ}\text{C}$), 40% mNaNO₂+7% mNaNO₃+53% mKNO₃ ($T_{\text{fusion}}=142^{\circ}\text{C}$).
- Les inorganiques, dont les rares candidats dans la gamme de température [12][13] sont soit indisponibles industriellement (l'ammonium zinc sulfate hexahydrate et le magnésium nitrate dihydrate, $T_{\text{fusion}}=125^{\circ}\text{C}$ et 130°C respectivement), soit prématurément dégradés (sodium acétate trihydrate, $T_{\text{fusion}}=137^{\circ}\text{C}$).

Parmi les 32 candidats, un grand nombre sont rapidement éliminés pour cause [12]–[15] :

- D'un coût trop élevé (- -) : acide mandélique, acide valporique, acide subérique, méthyl-4'-acétanilide [10], acide chrolobenzoïque et xylose-L ;
- D'une dégradation prématurée (température de décomposition de T_{fusion} : $\Delta T < 20^{\circ}\text{C}$) : urée, acide malonique, acide maléique, DL-acide malique, acide trans cinnamique, fructose-D et glucose-D ;
- D'une variation d'enthalpie inférieure à 50 kWh.m⁻³ : polyéthylène réticulé [16], stilbène, et trans-1,4-polybutadiène [5] ;
- D'une dangerosité d'utilisation (inflammabilité, toxicité) : acide picrique, benzamide, phénacétine, et acide anthranilique ;
- D'une surfusion trop importante (plus de 30°C) : erythritol (malgré une variation enthalpie de fusion très attractive) et trométhanol (cumule un coût élevé) [17].

Plusieurs polyols semblent intéressants : le maltitol, l'isomalt [18], le xylose-D et le lactitol. Cependant, les deux premiers se sont décomposés lors du premier cyclage, et les deux derniers n'étaient pas disponibles en quantités industrielles. Six MCP ont été sélectionnés pour une étude plus approfondie : l'acide succinique anhydre, l'acide benzoïque, l'anhydre phtalique [19], l'acide sébacique [20], le diméthyl téréphtalate et l'acide adipique. Leur température et leur chaleur latente de fusion seront vérifiées par calorimétrie différentielle à balayage (DSC), ainsi que leur maintien lors de cyclages. Enfin, leur dégradation thermique sera contrôlée par thermogravimétrie.

3. Analyses thermiques

3.1. Matériel et méthode

3.1.1. Analyse calorimétrique (DSC)

Les mesures de calorimétrie sont réalisées par le calorimètre à compensation de puissance Pyris Diamond DSC de Perkin-Elmer, dans des cellules hermétiques (21 bars) de capacité 60 µL. Une fois remplies de MCP, les cellules sont serties à l'aide d'une presse. Les cellules sont pesées avec une précision de 0,002 mg à l'aide de la balance Mettler Toledo XP26. L'incertitude sur la masse de l'échantillon est donc de 0,004 mg (cellules vides et pleines).

Ces essais permettent à la fois de vérifier les valeurs des températures de fusion et des variations d'enthalpies de changement de phase des matériaux sélectionnés, et de tester leur tenue thermique lors de plusieurs cycles de fusion/cristallisation. Afin de réduire le temps d'expérimentation, une vitesse de 20°C.min⁻¹ a été fixée lors des rampes de chauffe et de refroidissement et des paliers isothermes d'une minute à des températures de 30°C au-dessus de la température de fusion et 30 °C au-dessous de la température de cristallisation.

Nom	Formule ou composition	ρ [kg.m ⁻³]	T _{fusion} [°C]	ΔH_{fusion} [kJ.kg ⁻¹]	$\Delta H_{\text{fusion, vol}}$ [kWh.m ⁻³]	N° CAS	Prix [€.kWh ⁻¹]	Commentaires
Erythritol	C ₄ H ₁₀ O ₄	1480	118-120	340	140	149-32-6	+++	Surfusion >80°C
Acide succinique anhydride	C₄H₄O₃	1560	118-121	206	89	108-30-5	++	
Acide mandélique	C ₆ H ₅ CH(OH)CO ₂ H	1300	118-121	161	58	90-64-2	--	Coût trop élevé
Acide valporique	C ₈ H ₁₆ O ₂	904	120	203	51	99-66-1	--	Coût trop élevé
Acide benzoïque	C₇H₆O₂	1266	121,7	143	50	65-85-0	++	Surfusion de 22°C
Acide picrique	C ₆ H ₃ N ₃ O ₇	1760	122	75	37	88-89-1		Point éclair à 150°C, explosif
Polyéthylène réticulé (HDPE)	(C ₂ H ₄) _n	940	125	167	44	9002-88-4		Enthalpie < 50 kWh.m ⁻³
Stilbène	C ₁₄ H ₁₂	970	126	167	45	103-30-0		Enthalpie < 50 kWh.m ⁻³
Benzamide	C ₉ H ₇ NO	1341	127,2	169	63	55-21-0		Toxique
Trométhamine/ Tromethanol	C ₄ H ₁₁ NO ₃	1353	131	285	107	77-86-1	-	Surfusion 66°C, coût élevé
Anhydride phthalique	C₈H₄O₃	1530	131	159	68	85-44-9	+++	Surfusion de 23°C
Acide sébacique	C₁₀H₁₈O₄	1209	131-133	243	82	111-20-6	++	
Acide maléique	C ₄ H ₄ O ₄	1590	131-140	235	104	110-16-7		Décomposition ~145°C
DL- acide malique	C ₄ H ₆ O ₅	1601	131-140	225	100	6915-15-7		Décomposition ~150°C
Urée	CO(NH ₂) ₂	1323	132	251	92	57-13-6		Faible stabilité
Acide malonique	C ₃ H ₄ O ₄	1620	132-136			141-82-2		Décomposition ~135°C
Acide trans cinnamique	C ₉ H ₈ O ₂	1250	133	153	53	140-10-3		Décomposition ~146°C
Phénacétine	C ₁₀ H ₁₃ NO ₂	1240	134	175	60	62-44-2		Toxique
Acide chrolobenzoïque	C ₇ H ₅ ClO ₂	1540	140	164	70	118-91-2	--	Coût trop élevé
Acide subérique	C ₈ H ₁₄ O ₄	1020	141-144	245	69	505-48-6	--	Coût trop élevé
Diméthyl téréphtalate	C₁₀H₁₀O₄	1290	142	170	61	120-61-6	++	
Fructose-D	C ₆ H ₁₂ O ₆	1690	144-145	145	68	57-48-7		Dégradation prématurée
Isomalt	C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁	1040	145	170	71	64519-82-0	-	
Trans-1,4-polybutadiène (TPB)	C ₄ H ₆	1010	145	144	40	25038-44-2		Enthalpie < 50 kWh.m ⁻³
Maltitol	C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁	1620	145-152	173	78	585-88-6	+++	
Méthyl-4'-acétanilide	C ₉ H ₁₁ NO	1370	146-151	180	69	103-89-9	---	Coût trop élevé
Lactitol	C ₁₂ H ₂₄ O ₁₁	1690	146-152	135-149	70	585-86-4	+++	Disponibilité industrielle
Acide anthranilique	C ₆ H ₄ (NH ₂)COOH	1410	147	148	58	118-92-3		Point éclair à 150°C
Xylose-D	C ₅ H ₁₀ O ₅	1525	147-151	216-280	118	58-86-6	+++	
Xylose -L	C ₅ H ₁₀ O ₅	1525	147-151	213	90	609-06-3	---	Coût trop élevé
Glucose -D	C ₆ H ₁₂ O ₆	1540	149-152	180	82	50-99-7		Faible stabilité
Acide adipique	C₆H₁₀O₄	1360	151-155	260	98	124-04-9	+++	

Tableau 2 : Candidats potentiels au stockage par chaleur latente dans la gamme 120-150°C [5] [10-20]

Les cycles correspondants sont schématisés sur la Figure 1 : le premier cycle correspond au conditionnement du MCP, le second sert de cycle de référence et est comparé aux 38^{ème} et 75^{ème} cycles afin de constater une éventuelle dégradation du MCP durant l'expérience.

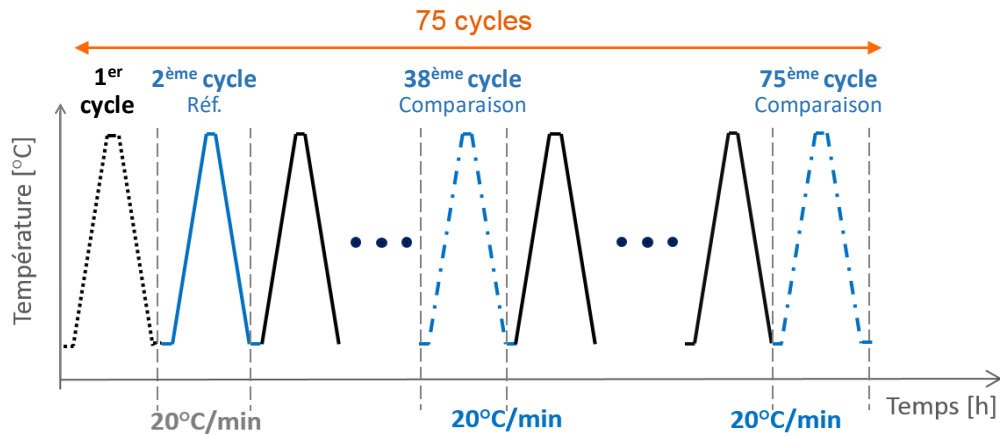


Figure 1 : Evolution des températures programmées pour le test de stabilité thermique des MCP

3.1.2. Analyse thermogravimétrique (ATG)

L'analyse thermogravimétrique (ATG) mesure le changement de masse des MCP lorsqu'ils sont soumis à une élévation anormale de température, afin de qualifier leur stabilité thermique si le système de stockage est exposé à une défaillance de régulation par exemple. Le thermogravimètre utilisé ici est le Setsys Cryostat de chez Setaram. Les essais ont été réalisés à l'aide d'une nacelle en alumine d'une contenance de 170 μL pouvant résister jusqu'à 1750 $^{\circ}\text{C}$, et les échantillons pesés avec la même balance que lors des essais de DSC (Mettler Toledo XP 26). Le gaz de balayage est l'air, représentatif des conditions industrielles. Chaque échantillon sera soumis au profil de température suivant :

- un palier isotherme de 10 minutes à 35 $^{\circ}\text{C}$ en dessous de la température de fusion ;
- une rampe de 2 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ jusqu'à 100 $^{\circ}\text{C}$ au-dessus de la température de fusion.

La température $T_{1\%}$, à partir de laquelle le matériau perd 1% de sa masse initiale, correspond au seuil à partir duquel la dégradation est supposée irréversible. Il faudra par conséquent que la différence de température entre T_{fusion} et $T_{1\%}$ soit suffisamment grande pour que le matériau puisse être utilisé à échelle industrielle sans risque de dégradation.

3.2. Caractérisation des matériaux sélectionnés

L'ensemble des mesures réalisées est synthétisé dans le Tableau 3. D'après l'analyse calorimétrique, les températures de fusion des matériaux (approximée graphiquement par T_{onset} , qui correspond à l'abscisse du premier point du pic exothermique) sont cohérentes avec la littérature et restent constantes au cours des cycles. Seule la fusion de l'anhydride succinique survient à une température plus basse qu'attendue, 115 $^{\circ}\text{C}$ au lieu de 118-121 $^{\circ}\text{C}$, éloignant ce candidat de la gamme de température ciblée.

Le phénomène de surfusion est lié à la géométrie de la cellule et notamment à son volume [17] : le volume des cellules de mesure n'étant pas représentatif des systèmes industriels, il n'est pas possible de conclure sur une valeur précise. Cependant, même si la surfusion sera moins importante sur un plus grand volume de MCP, la moyenne des écarts entre les températures de fusion et de cristallisation (degré de surfusion moyen) peuvent s'avérer

problématiques dans le cas de l'anhydride succinique ($\Delta T_{\text{moy}} = 60,8^{\circ}\text{C}$) et dans une moindre mesure de l'anhydride phtalique ($\Delta T_{\text{moy}} = 27,3^{\circ}\text{C}$) et de l'acide benzoïque ($\Delta T_{\text{moy}} = 25^{\circ}\text{C}$).

Les chaleurs latentes de fusion mesurées sont globalement légèrement inférieures (moins de 5%) à celles répertoriées dans la littérature, avec une chute plus marquée pour l'acide sébacique (8,5%) et l'anhydride succinique (12,5%). Au cours des cycles, cette variation d'enthalpie diminue de plus de 5% dans le cas de l'anhydride succinique, de l'anhydride phtalique, du diméthyl téréphtalate et l'acide benzoïque ; allant jusqu'à 11% de diminution entre le 2nd et le 75^{ème} cycle pour l'anhydride phtalique. Cette baisse des performances pourrait être nuisible à une utilisation impliquant des phases répétées de fusion/cristallisation.

Cette stabilité critique est confirmée par les essais de thermogravimétrie : ces quatre matériaux présentent une perte de masse supérieure à 1% à une température très proche voire inférieure à leur température de fusion. A la fin de l'essai, la totalité des échantillons s'était évaporée. Cette dégradation n'est pas compatible avec l'usage industriel visé, ces matériaux sont donc écartés de l'étude.

	DSC (2 nd , 38 ^{ème} et 75 ^{ème} cycles)							ATG
	T_{onset} [°C]			$\Delta H_{\text{fusion, vol}}$ [kWh.m ⁻³]			ΔT_{moy} [°C]	$T_{1\%}$ [°C]
<i>Précision</i>	± 0.4			$\pm 1.3\%$			± 0.4	-
Acide sébacique	131,5	130,3	130,8	75	70	71	11,7	181,0
Acide adipique	150,0	149,1	149,6	95,2	92,6	92,2	10,0	186,1
Anhydride phtalique	129,1	128,9	129	65,9	60,4	58,7	27,3	124,0
Anhydride succinique	115,3	115,7	115,3	77,6	74,5	71,9	60,8	115,7
Diméthyl téréphtalate	140,2	139,9	140,4	58,4	54,8	53,4	9,7	128,7
Acide benzoïque	121,5	120,5	120,7	49,6	47,1	46,4	25,0	122,4

Tableau 3 : Synthèse des caractéristiques thermiques des MCP sélectionnés

Seuls deux candidats sont donc finalement retenus : l'acide sébacique et l'acide adipique. La stabilité de leurs propriétés doit à présent être vérifiée dans le temps.

4. Etude de stabilité des candidats retenus

Des analyses de vieillissement thermique de l'acide adipique et de l'acide sébacique ont été réalisées sur une durée de deux mois. Pour ce faire, trois étuves ont été maintenues à trois températures différentes. Chaque étuve contenait des flacons hermétiquement fermés dont le contenu a été analysé par calorimétrie après différentes durées de vieillissement. Les MCP ont été prélevés selon la fréquence suivante : 1 jour, 2 jours, 4 jours, 8 jours, 16 jours, 30 jours, et 60 jours et ont été étudiés par calorimétrie afin d'observer l'évolution de leurs propriétés thermo-physiques. Les températures des étuves sont fixées à 15°C, 25°C et 35°C de plus que les températures de fusion des deux matériaux étudiés (respectivement T1, T2 et T3) afin de se rapprocher des contraintes susceptibles d'être rencontrées dans le milieu industriel. Cette étude a été réalisée sur des matériaux de qualité industrielle, dont il a été vérifié que les propriétés correspondaient aux matériaux de qualité laboratoire étudiés en première partie.

Les Figures 2 et 4 illustrent l'évolution des T_{onset} respectivement de l'acide adipique et de l'acide sébacique, tandis que les Figures 3 et 5 décrivent celle de la chaleur latente des mêmes matériaux. Au vu de ces courbes, aucune tendance nette de dégradation des propriétés n'est observée, que ce soit pour l'acide adipique ou l'acide sébacique.

Ces deux matériaux semblent donc être les candidats les plus prometteurs pour une application de stockage thermique valorisant des chaleurs fatales entre 120°C et 160°C.

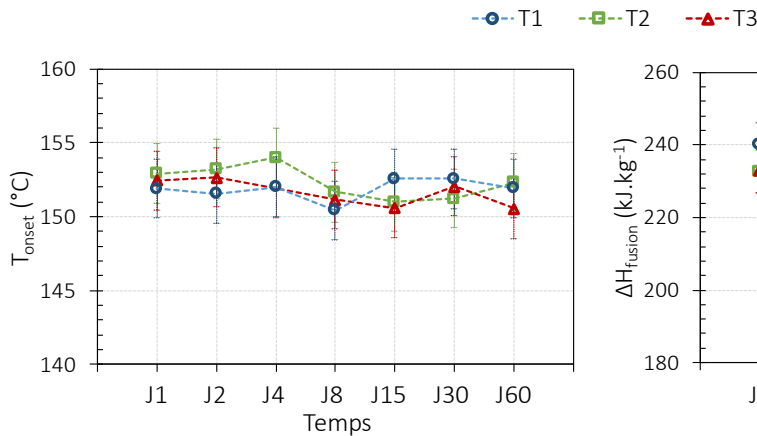


Figure 2 : Evolution de T_{onset} de l'acide adipique en fonction du temps

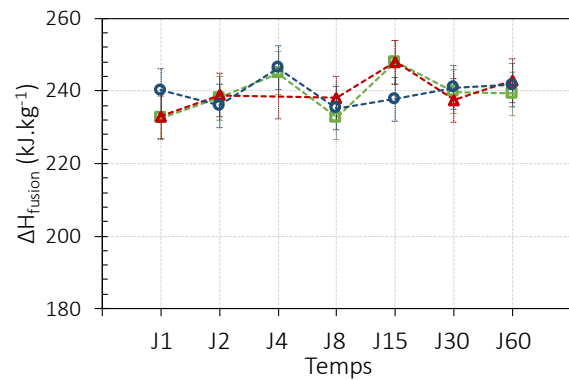


Figure 3 : Evolution de ΔH_{fusion} de l'acide adipique en fonction du temps

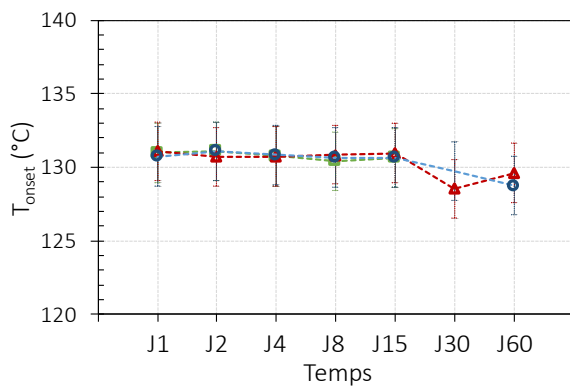


Figure 4 : Evolution de T_{onset} de l'acide sébacique en fonction du temps

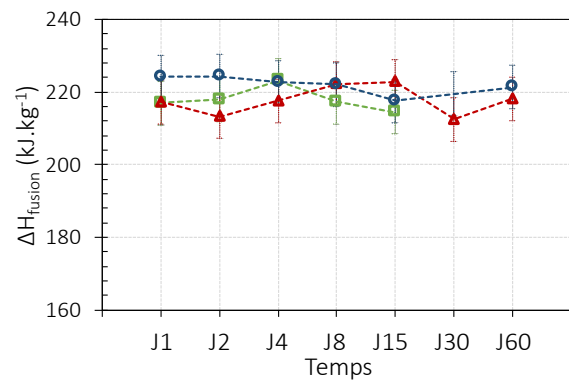


Figure 5 : Evolution de ΔH_{fusion} de l'acide sébacique en fonction du temps

5. Conclusion

Cette étude avait pour objectif d'identifier des matériaux à changement de phase (MCP) adaptés à la valorisation de chaleurs fatales entre 120°C et 150°C, identifiée comme la gamme de température au potentiel à la fois le plus conséquent et le moins exploité. Une première sélection basée sur la température de fusion des matériaux a retenu 32 candidats potentiels. En intégrant des critères de stabilité thermique, de non toxicité, de variation d'enthalpie minimale (plus de 50 kWh.m⁻³), de coût maximal (idéalement moins de 100 €.kWh⁻¹) et de disponibilité industrielle, la liste a été réduite à six matériaux : l'acide succinique anhydre, l'acide benzoïque, l'anhydre phtalique, l'acide sébacique, le diméthyl téréphtalate et l'acide adipique.

Le comportement au cyclage et la dégradation thermique de ces matériaux ont été étudiés par calorimétrie et thermogravimétrie. L'acide succinique anhydre, l'acide benzoïque, l'anhydre phtalique, et le diméthyl téréphtalate ont présenté une perte de masse supérieure à 1% pour des températures très proches de leur température de fusion (moins de 2°C d'écart). Ces candidats ont donc été jugés inadaptés à une utilisation industrielle. Afin d'étudier leur vieillissement potentiel à des températures élevées pouvant ponctuellement être atteintes, l'acide adipique et l'acide sébacique ont été maintenus à des températures supérieures à leur température de fusion de 15°C, 25°C et 35°C pendant 1 à 60 jours. Les caractérisations régulières effectuées sur cette durée n'ont pas mis en évidence de dégradation notable de leurs propriétés thermo-physiques (T_{onset} et ΔH_{fusion}) : il s'agit donc de candidats prometteurs pour l'application visée. Leur adéquation à un système de stockage complet pourra être validée par de futurs travaux caractérisant la compatibilité entre le MCP et son enveloppe.

Références

- [1] ADEME, “Intégration des énergies renouvelables et de récupération dans l’industrie,” 2018.
- [2] M. Papapetrou *et al.*, “Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 138, 2018.
- [3] U.S. Department of Energy, “Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry.” 2008.
- [4] A. M. López-Sabirón *et al.*, “Environmental profile of latent energy storage materials applied to industrial systems,” *Sci. Total Environ.*, vol. 473–474, pp. 565–575, 2014.
- [5] B. Zalba *et al.*, “Review on thermal energy storage with phase change: materials , heat transfer analysis and applications,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, pp. 251–283, 2003.
- [6] A. Sharma, V. V Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Ren. and Sust. En. Rev.*, vol. 13, pp. 318–345, 2009.
- [7] S. A. Mohamed *et al.*, “A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 70, 2017.
- [8] IRENA, “Thermal Energy Storage,” *Technological Brief*, no. January. 2013.
- [9] A. R. Espagnet, “Techno-Economic Assessment of Thermal Energy Storage integration into Low Temperature District Heating Networks,” KTH School of Industrial Engineering and Management, 2016.
- [10] N. R. Jankowski and F. P. McCluskey, “A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1525–1561, 2014.
- [11] T. Delise *et al.*, “Thermophysical , environmental , and compatibility properties of nitrate and nitrite containing molten salts for medium temperature CSP applications : A critical review,” *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 39, no. 1, pp. 92–99, 2019.
- [12] J. Waschull *et al.*, “Investigation of phase change materials for elevated temperatures,” Dresden, Germany, 2009.
- [13] S. D. Sharma and K. Sagara, “Latent Heat Storage Materials and Systems: A Review,” *Int. J. Green Energy*, vol. 2, pp. 1–56, 2005.
- [14] D. Hailot *et al.*, “Thermal analysis of phase change materials in the temperature range 120 – 150°C,” *Thermochim. Acta*, vol. 513, no. 1–2, pp. 49–59, 2011.
- [15] S. D. Sharma *et al.*, “Phase Change Materials for Low Temperature Solar Thermal Applications,” *Res. Rep. Fac. Eng. Mie Univ*, 2004.
- [16] H. Nazir *et al.*, “Recent developments in phase change materials for energy storage applications : A review,” vol. 129, pp. 491–523, 2019.
- [17] J.-P. Dumas, “Etude de la rupture de métastabilité et du polymorphisme de corps organiques,” Université de Pau, 1976.
- [18] T. Kouadio and A. Sommier, “Characterization of different sugar alcohols as phase change materials for thermal energy storage applications,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 159, pp. 560–569, 2017.
- [19] J. Pereira da Cunha and P. Eames, “Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials - A review,” *Appl. Energy*, vol. 177, 2016.
- [20] Z. Huang *et al.*, “Characterization of medium-temperature phase change materials for solar thermal energy storage using temperature history method,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 179, pp. 152–160, 2018.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude au projet ANR STEEP et à ses partenaires EDF, CIAT, CRISTOPIA et IM2NP.