

Gestion thermique du pack de batteries utilisant des matériaux à changement de phase pour les véhicules électriques

Mohammed MASHAQI¹, Nassim RIZOUG¹, Chérif LAROUCI¹, Mustapha KARKRI², Mahamadou Abdou TANKARI²

¹ ESTACA, ESTACA'Lab - Laval, F-53000 Laval, France ² Université Paris-Est Créteil (UPEC) - France

RESUME – Cette étude utilise Ansys Fluent 3D pour simuler un système de gestion thermique basé sur les matériaux à changement de phase (PCM) pour les packs de batteries lithium-ion des petits véhicules électriques. Les PCM offrent une grande capacité de stockage thermique à température constante, mais leur faible conductivité thermique constitue un défi, atténué par l'incorporation de matrice thermo diffusante en aluminium (MTD). L'étude analyse l'évolution de la température de la batterie avec et sans PCM sous différentes conditions ambiantes. Les résultats montrent que l'intégration des PCM réduit la température de la batterie de 9,8°C, tandis qu'une isolation externe à 40°C la diminue jusqu'à 2,25°C. De plus, les MTD jouent principalement un rôle dans la régénération du PCM plutôt que dans le refroidissement direct de la batterie. Une masse totale de 1,8 kg de PCM représente la quantité minimale optimale requise pour assurer le refroidissement efficace d'un pack de batteries de 5,65 kWh dans la configuration du système de gestion thermique étudiée. Ces résultats soulignent le potentiel des PCM comme alternative aux méthodes de refroidissement traditionnelles.

Mots-clés – Gestion Thermique, Batterie, Véhicules Électriques, Matériau à Changement de Phase, Stockage de l'énergie.

1. INTRODUCTION

La batterie lithium-ion a une grande capacité de stockage, ce qui en fait la source d'énergie principale pour les véhicules électriques. Cependant, La batterie lithium-ion nécessite un système de gestion thermique, car elle perd progressivement sa capacité de stockage d'énergie, réduisant ainsi sa durée de vie. Sans système de gestion thermique, l'autonomie du véhicule diminue également. La température de la batterie doit être maintenue autour de sa température optimale. En général, la température idéale de la batterie se situe entre 10 et 30°C selon Renault [1].

Les petits véhicules électriques utilisent souvent la convection naturelle pour la gestion thermique de la batterie, mais cette méthode passive entraîne des températures plus élevées, ce qui peut nuire à la durée de vie de la batterie. Pour y remédier, des solutions innovantes comme les matériaux à changement de phase sont explorées pour améliorer l'efficacité thermique, notamment pour les véhicules électriques sans permis et les trottinettes [2,3].

Les matériaux à changement de phase (PCM) absorbent la chaleur à une température constante, appelée température de fusion, en passant de l'état solide à l'état liquide. Ils ne nécessitent pas de source d'énergie externe et ne comportent aucune pièce mobile, offrant ainsi une solution de refroidissement passive et efficace pour des systèmes tels que les batteries.

Les matériaux à changement de phase commerciaux, comme la cire de paraffine, sont peu coûteux (environ 2 \$/kg) [4], mais leur faible conductivité thermique nécessite une amélioration. Cette étude utilise des MTD en aluminium avec le PCM, choisis pour leur emballage simple. Dans cette étude, nous investiguons l'utilisation de matériaux à changement de phase comme système de gestion thermique en réalisant une simulation numérique 3D à l'aide d'Ansys Fluent pour un pack de batteries com-

posé de 36 batteries lithium-ion. L'énergie nominale du pack est de 5,6 kWh, ce qui est presque équivalent à celle du véhicule électrique sans permis Citroën Ami [5].

2. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

2.1. Batterie

La batterie a une chimie de cathode NMC et possède une forme prismatique. Les cellules prismatiques offrent une excellente stabilité mécanique et optimisent l'utilisation de l'espace par rapport aux cellules cylindriques et pouch, ce qui les rend idéales pour des packs de batteries de véhicules électriques efficaces et compacts. Le pack de batteries se compose de 36 cellules. Nous avons simulé uniquement 18 cellules grâce à la symétrie, ce qui a réduit de moitié le temps de calcul dans Ansys Fluent. La batterie utilisée est issue d'une étude expérimentale de la littérature [6], dans laquelle ses propriétés thermophysiques sont entièrement définies. Elle présente une capacité nominale de 43 Ah et une tension nominale de 3,65 V. Par conséquent, l'énergie nominale du pack est de 5,65 kWh. Elle possède des dimensions de 148 mm en hauteur, 27,5 mm en épaisseur et 91 mm en largeur. Sa masse est de 0,84 kg, avec une densité massique de 2268 kg/m³. Sa capacité thermique massique est de 933,7 J/kg.K, et ses conductivités thermiques dans les directions x, y et z sont respectivement de 4,43, 2,72 et 0,82 W/m.K. La résistance interne est de 0,002 Ohm.

2.2. PCM

La température de fusion du PCM doit être entre 10 et 30°C [1]. Un PCM à température de fusion trop basse, comme 20°C, pourrait fondre trop tôt, perdant sa capacité à absorber la chaleur. Le RT25HC a été choisi, car il est optimal pour les batteries lithium-ion. Il est fabriqué par RUBITHERM GmbH [7]. Ce matériau présente une température de fusion comprise entre 22°C (solidus) et 26°C (liquidus). Ce PCM est stable, non toxique et non corrosif, idéal pour la gestion thermique des batteries. Le PCM est combiné avec MTD pour améliorer le transfert de chaleur. La MTD adoptée est une configuration à ailettes en aluminium (voir Fig. 6).

2.3. Isolation

L'isolation du pack de batteries est cruciale pour réduire le transfert de chaleur entre les batteries et l'environnement. Le Korund [8] est utilisé comme matériau d'isolation thermique pour le boîtier externe du pack de batteries. Une mousse de polyuréthane de la société Rogers Corporation, de la gamme de produits PORON EVExtend®, est utilisée comme couche isolante entre les batteries, avec une épaisseur de 1 mm.

2.4. Géométrie

Le pack de batteries se compose de 36 cellules, mais seules 18 cellules ont été simulées grâce à la symétrie selon l'axe z.

La Fig. 1 montre le pack de batteries simulé. La boîte PCM est située entre chaque paire de rangées de batteries et en contact avec la grande surface des batteries pour un meilleur transfert de chaleur. L'épaisseur totale du boîtier PCM (casing) est de 11 mm, dont 1 mm correspond à l'aluminium et 10 mm à l'épaisseur interne remplie de PCM.

Le choix de l'épaisseur du PCM repose sur les résultats d'un modèle transitoire unidimensionnel développé sous Wolfram Mathematica. Il a été déterminé que 10 mm représente l'épaisseur minimale envisageable. La Fig. 2 présente les résultats de ce modèle 1D transitoire. Il en ressort que, pour chaque batterie, une épaisseur de PCM de 5 mm est suffisante, car elle constitue le compromis optimal entre la masse ajoutée et la réduction de température à la fin de la décharge complète. En tenant compte de notre configuration, où le boîtier PCM est positionné entre chaque paire de batteries, une épaisseur totale de 10 mm est recommandée (2 × 5 mm). L'analyse basée sur le modèle 1D montre que l'augmentation de l'épaisseur du PCM au-delà de cette valeur n'apporte pas de réduction supplémentaire de la température des batteries.

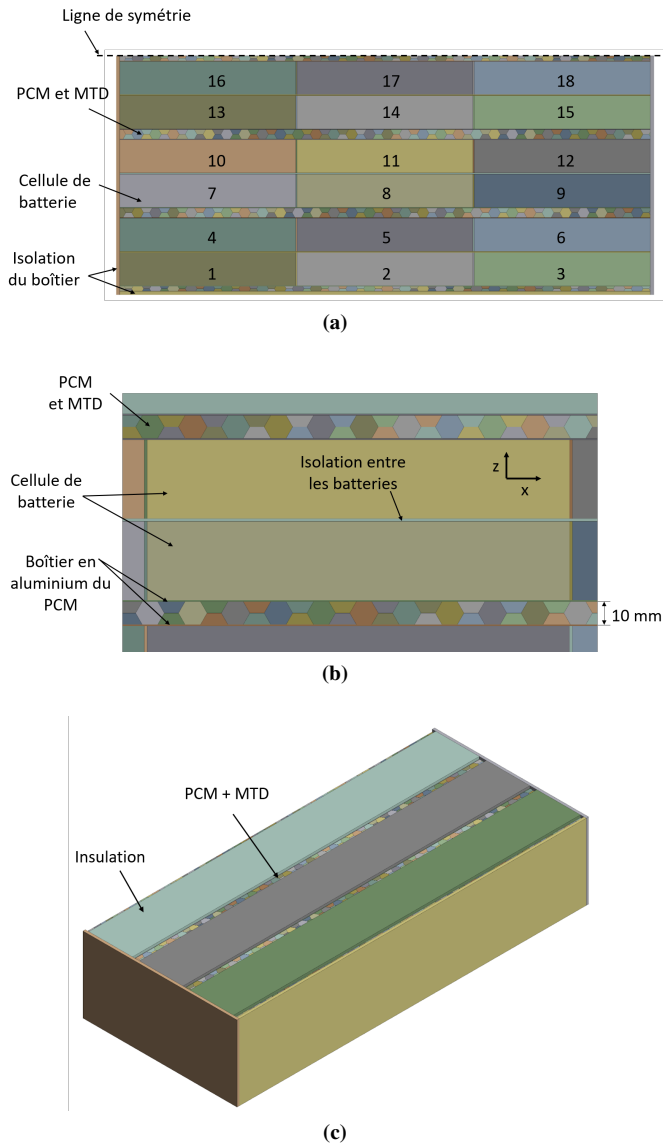


FIG. 1. Le pack de batteries simulé : (a) une vue de dessus du pack de batteries, les numéros indiquent la position des cellules dans le pack; (b) un zoom sur la vue de dessus pour une meilleure visualisation des détails; (c) une vue isométrique du pack de batteries simulé recouvert de l'isolant.

La cellule de batterie est considérée comme un bloc thermique. La génération de chaleur de la batterie est estimée en

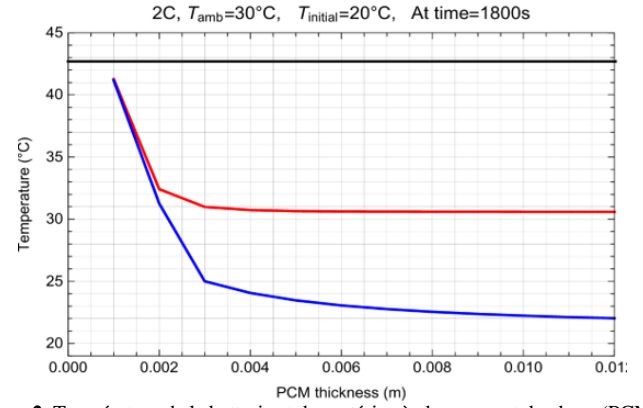


FIG. 2. Température de la batterie et du matériau à changement de phase (PCM) à la fin du cycle en fonction de l'épaisseur PCM. Rouge : batterie, Bleu : PCM.

prenant uniquement la résistance interne de la cellule de batterie, en d'autres termes, uniquement les effets Joule, de sorte que la puissance dissipée par une batterie peut être exprimée comme

$$Q_g = I^2 R_{int} \quad (1)$$

où Q_g (W) représente la chaleur générée qui doit être dissipée de la batterie, R_{int} est la résistance interne d'une seule batterie, qui est de 0,002 Ohm. Le courant de décharge appliqué (I) est fixé à 86A. Autrement dit, le taux de décharge est de 2C, ce qui signifie que la batterie délivre toute son énergie en 30 minutes (soit 1800 secondes), étant donné que sa capacité est de 43 Ah. Le fabricant indique 2C comme le courant maximal que les cellules peuvent supporter en toute sécurité, comme précisé dans la fiche technique. Pour nos simulations, nous avons choisi de faire fonctionner les cellules à cette limite maximale afin d'évaluer les performances de notre concept dans les conditions les plus contraignantes autorisées. La chaleur générée résultante d'une seule batterie, en utilisant l'équation (1), est de 14,8 W.

3. RÉSULTATS

La température initiale de tous les composants, y compris la batterie, est fixée à 20°C, proche de la température optimale de fonctionnement. La température ambiante est fixée à 30°C, reflétant des conditions thermiques difficiles fréquemment rencontrées dans les climats plus chauds de l'Europe. Le courant de décharge est réglé à 86A (2C), et toutes les surfaces externes ont une condition aux limites de convection libre avec un coefficient de transfert de chaleur de 5 W/m².K. Cette configuration permet d'évaluer les performances du système dans des conditions constantes et difficiles.

Effet de l'ajout de PCM

La Fig. 3 illustre l'effet de l'ajout d'un boîtier PCM sur la température moyenne de la batterie 2, une position critique représentant le comportement du pack. Après 1800 s, c'est-à-dire une fois que la batterie a été complètement déchargée, l'élévation de température sans PCM est de 21,1°C, tandis qu'avec PCM, elle est de 11,3°C, montrant une réduction de 9,8°C. La température du PCM atteint 25°C, restant en dessous de sa température de fusion, ce qui empêche sa liquéfaction complète et renforce la sécurité.

La Fig. 4 montre une carte de température 3D du pack de batteries, et l'on peut clairement observer une réduction de température après l'ajout du PCM au pack. Dans la Fig. 4(b), on remarque distinctement certaines zones bleues dans le boîtier PCM; ces zones ont une température inférieure à la température de fusion du PCM (26°C), car dans ce cas, le PCM ne devient pas entièrement liquide.

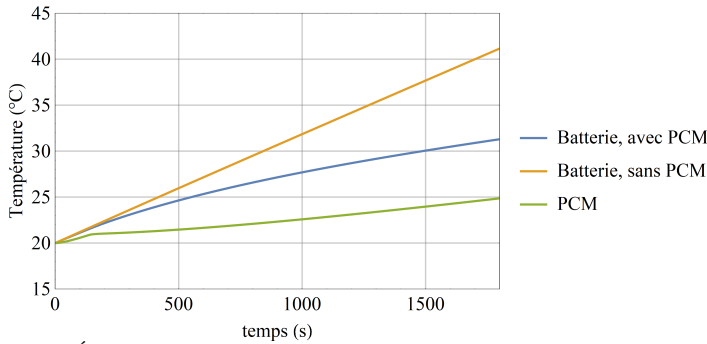
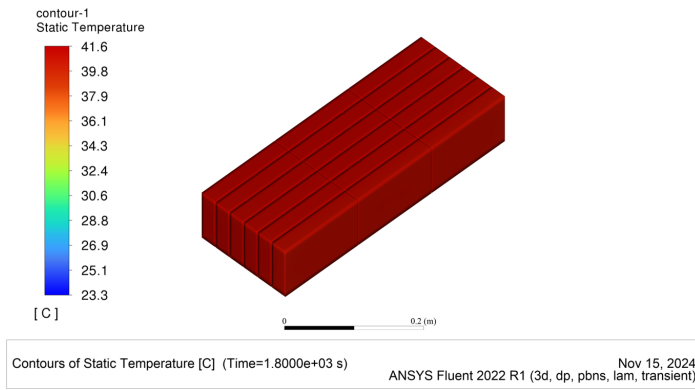
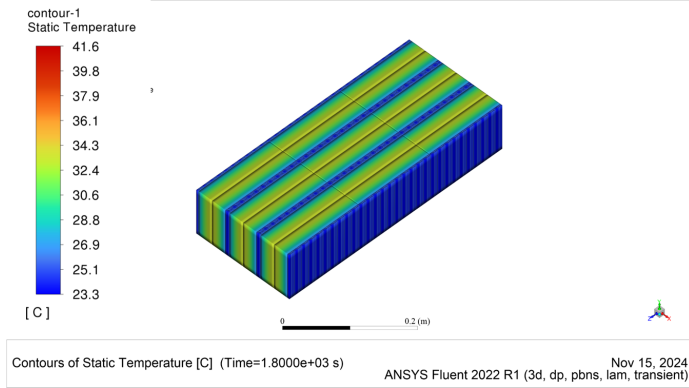


FIG. 3. Évolution de la température de la batterie avec et sans PCM (pour la batterie numéro 2).



(a) Sans PCM



(b) Avec PCM

FIG. 4. Carte de température du pack de batteries, sans et avec PCM

Effet de la température ambiante

La Fig. 5 montre la température moyenne du volume de la batterie ($T_{batterie}$) à la fin de la décharge à différentes températures ambiantes (de 0 à 40°C), pour les cas avec et sans PCM ainsi qu'avec et sans isolation. On peut observer que la pente des courbes avec PCM est plus faible que celle des courbes pour le cas sans PCM, et qu'elles sont également plus faibles en valeurs pour toutes les températures ambiantes mentionnées.

Étude des différentes configurations géométriques de la MTD

Le PCM présente une faible conductivité thermique, ce qui nécessite l'ajout d'une technique d'amélioration pour permettre une régénération rapide. Pour des raisons de simplicité d'intégration, des ailettes en aluminium ont été choisies comme technique d'amélioration du transfert thermique. D'après les résultats obtenus à partir d'un modèle thermique unidimensionnel, une épaisseur de PCM de 10 mm offre un compromis optimal

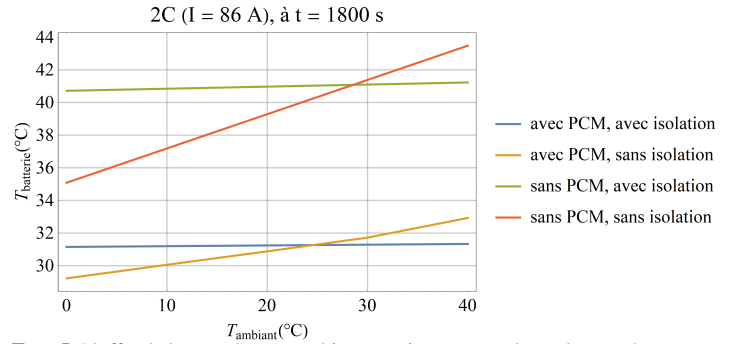
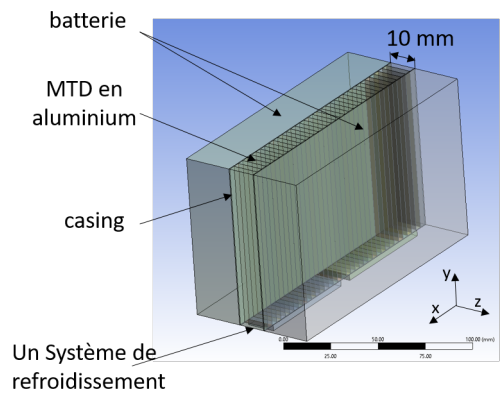
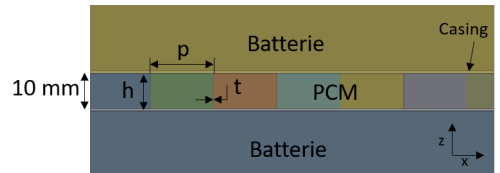


FIG. 5. L'effet de la température ambiante environnementale sur la température de la batterie

entre performance thermique et masse (voir Fig. 2). Par conséquent, la hauteur des ailettes a également été fixée à 10 mm pour correspondre à l'épaisseur du PCM.



(a) Représentation 3D de la MTD et de l'emplacement du système de refroidissement



(b) Paramètres géométriques des ailettes

FIG. 6. Représentation de la MTD et de ses paramètres géométriques, où p désigne le pas des ailettes, h la hauteur des ailettes, et t l'épaisseur des ailettes.

Afin d'optimiser la conception des ailettes, une série de simulations a été réalisée en se concentrant sur la régénération du PCM — c'est-à-dire la re-solidification du matériau après l'absorption de chaleur pendant la décharge de la batterie. La méthode de régénération utilise un système de refroidissement, pouvant notamment être un module Peltier, placé sous le boîtier contenant le PCM dans le pack, comme illustré à la Fig. 6. Ces simulations visaient à déterminer l'épaisseur et l'espacement optimaux des ailettes (pas d'ailettes) pour minimiser à la fois le temps de régénération du PCM et la masse totale de PCM requise.

Les conditions aux limites des simulations étaient les suivantes : 1) La température initiale de la batterie et du PCM était fixée à 32°C, représentant des conditions sévères dans lesquelles le PCM est entièrement à l'état liquide, puisque 32°C dépasse sa température de liquidus de 26°C. 2) Le système de refroidissement maintenait une température constante de 20°C, ce qui constitue une température de conditionnement adéquate pour le PCM. En effet, cette température est inférieure à la température de solidus du PCM (22°C), garantissant que celui-ci reste à

l'état solide. Cela permet d'assurer la régénération complète du matériau en vue d'un nouveau cycle d'utilisation de la chaleur latente. De plus, cette température est cohérente avec celle de la batterie en fonctionnement, ce qui rend le conditionnement thermique du système à 20°C particulièrement pertinent et efficace. Dans ANSYS Fluent, le système de refroidissement a été représenté par une condition aux limites de température constante (20°C) appliquée à la paroi inférieure du boîtier contenant le PCM.

L'objectif était de refroidir le PCM de 32°C à 20°C, en simulant les conditions thermiques pendant la phase de recharge du véhicule. Il a été défini comme exigence de conception que la régénération complète du PCM devait être réalisée en moins de 2 heures — durée typique d'un cycle de recharge — et que la masse de PCM ne devait pas être inférieure à 1,6 kg, quantité minimale nécessaire pour maintenir une température optimale de la batterie lors de la décharge.

TABLEAU 1. Temps de régénération du PCM (en heures) et masse totale correspondante de PCM pour différentes combinaisons de pas et d'épaisseur des ailettes, avec une hauteur d'ailettes fixe de 10 mm

(a) Temps de régénération du PCM

h=10mm	Temps de régénération du PCM (h)			
t(μm)\p(mm)	2	3	4	5
50	2.62	2.75	2.89	3.09
100	2.20	2.43	2.62	2.83
150	1.90	2.18	2.41	2.62
200	1.67	1.98	2.23	2.44
250	1.49	1.81	2.08	2.29
300	1.34	1.67	1.94	2.16
350	1.22	1.55	1.82	2.04
400	1.11	1.44	1.72	1.93
450	1.02	1.35	1.62	1.84
500	0.95	1.26	1.54	1.75
1000	0.50	0.75	0.99	1.20

(b) Masse de PCM

h=10mm	Masse de PCM (kg)			
t(μm)\p(mm)	2	3	4	5
50	1.95	1.97	1.97	1.98
100	1.90	1.93	1.95	1.96
150	1.85	1.90	1.92	1.94
200	1.80	1.87	1.90	1.92
250	1.75	1.83	1.87	1.90
300	1.70	1.80	1.85	1.88
350	1.65	1.77	1.82	1.86
400	1.60	1.74	1.80	1.84
450	1.55	1.70	1.77	1.82
500	1.50	1.67	1.75	1.80
1000	1.00	1.34	1.50	1.61

Les résultats des simulations, présentés dans le Tableau 1, ont montré que plusieurs configurations d'ailettes répondaient à ces exigences. Pour intégrer une marge de sécurité, une augmentation de 12% de la masse de PCM a été envisagée, portant la masse totale à 1,8 kg. Cet ajustement permet de tenir compte des éventuelles variations des conditions de fonctionnement.

Les résultats montrent que, pour atteindre un temps de régénération du PCM inférieur à 2 heures avec une masse de PCM de 1,8 kg, quatre configurations avec une hauteur d'ailettes de 10 mm sont viables. Les paires pas/épaisseur des ailettes sont les suivantes : (2 mm, 200 μm), (3 mm, 300 μm), (4 mm, 400 μm) et (5 mm, 500 μm). Ces résultats révèlent une relation linéaire entre le pas des ailettes et leur épaisseur.

4. CONCLUSION

Cette étude a utilisé des simulations 3D dans Ansys Fluent pour examiner l'évolution des températures de la batterie et du PCM, introduisant un PCM amélioré avec un MTD pour une meilleure gestion thermique des packs de batteries. L'ajout du PCM réduit la température de la batterie de 9,8°C. Il est essentiel de bien choisir la quantité de PCM pour qu'il reste partiellement solide pendant l'opération. De plus, l'étude a révélé qu'à des températures élevées, la température de la batterie augmente rapidement lorsque le PCM fond complètement, ce qui justifie l'utilisation d'un système de refroidissement pour la régénération du PCM, placé sous le boîtier contenant le PCM. Les résultats indiquent qu'une masse totale de 1,8 kg de PCM est nécessaire pour maintenir la température de la batterie dans les limites souhaitées à l'aide du système de gestion thermique à changement de phase. Cette quantité de PCM correspond à un pack de batteries d'une capacité nominale de 5,65 kWh, composé de 36 cellules. De plus, afin d'assurer une régénération complète du PCM en moins de deux heures – durée correspondant typiquement à la recharge d'un véhicule – une matrice thermodiffusive (MTD) est requise. Le processus de régénération est assuré par un système de refroidissement représenté, dans la simulation, par une température constante de 20°C imposée à la paroi inférieure du boîtier contenant le PCM, reproduisant ainsi le comportement thermique d'un module Peltier. Une étude paramétrique a été menée pour déterminer la configuration optimale de la MTD. Les résultats montrent que plusieurs combinaisons d'espacement (pas) et d'épaisseur des ailettes, avec une hauteur d'ailettes fixe de 10 mm, satisfont aux exigences de performance thermique et de temps de régénération. En outre, une relation linéaire entre le pas et l'épaisseur des ailettes a été observée. Par exemple, une configuration avec un pas de 3 mm et une épaisseur d'ailettes de 300 μm permet de respecter à la fois la contrainte de régénération en moins de deux heures et celle d'une masse de PCM de 1,8 kg.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Francois Orsini, R. ELECTROCHIMIE APPLIQUEE AU STOCKAGE ET A LA CONVERSION DE L'ENERGIE : CONCEPTION DES SYSTEMES ET COUPLAGES. 2023.
- [2] Khateeb, S.A.; Farid, M.M.; Selman, J.R.; Al-Hallaj, S. Design and simulation of a lithium-ion battery with a phase change material thermal management system for an electric scooter. Journal of power sources 2004, 128, 292-307.
- [3] Latent Heat Solutions, Fill & Flow FOR Thermal Regulation. Available online : <https://www.lhsmaterials.com/thermal-regulation/> (accessed on 14/11/2024).
- [4] Bland, A.; Khzouz, M.; Statheros, T.; Gkanas, E.I. PCMs for residential building applications : A short review focused on disadvantages and proposals for future development. Buildings 2017, 7, 78.
- [5] Citroën Ami (electric vehicle). Available online : [https://en.wikipedia.org/wiki/Citro%C3%ABn_Ami_\(electric_vehicle\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Citro%C3%ABn_Ami_(electric_vehicle)) (accessed on 14/11/2024).
- [6] Akbarzadeh, M.; Kalogiannis, T.; Jaguemont, J.; He, J.; Jin, L.; Berecibar, M.; Van Mierlo, J. Thermal modeling of a high-energy prismatic lithium-ion battery cell and module based on a new thermal characterization methodology. Journal of Energy Storage 2020, 32, 101707.
- [7] PCM RT line - Technical datasheet of RT25HC. Available online : https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_RT25HC_EN_09102020.PDF (accessed on 15/11/2024).
- [8] Insulation, K.-U.T.T. CARACTERISTIQUES DES ISOLANTS ULTRA MINCES KORUND FACADES – CLASSIC - LOTUS – ANTICOR - Datasheet of Korund. 2024.