

Modélisation numérique des matériaux à changement de phase

Numerical modelisation of the Phase Change Materials

Kawtar Esstar¹, Bouchaib Radi¹, Abdelkhalak El Hami²

¹ Laboratoire de recherche Ingénierie des Systèmes Avancés et Innovation, Université Hassan I, SETTAT
k.esstar.doc@uhp.ac.ma

¹ Laboratoire de recherche Ingénierie des systèmes avancés et innovation, Université Hassan I, SETTAT,
bouchaib.radi@yahoo.fr

² Laboratoire de Mécanique de Normandie, INSA Rouen, France, aelhami@insa-rouen.fr

RÉSUMÉ. Les systèmes de refroidissement traditionnels n'ont pas la capacité d'assurer un bon transfert d'énergie thermique. Grâce à l'évolution de ces systèmes, il est possible d'améliorer les nouveaux dispositifs. La présente recherche porte sur la démonstration de l'effet des matériaux à changement de phase (MCP) pour une gestion thermique optimale, en utilisant un dissipateur thermique. Ce type de matériaux ont la capacité d'absorber l'énergie thermique dissipée par les composants électroniques. Le matériau utilisé est le n-Eicosane, choisi pour ses propriétés physiques et chimiques. La méthode des éléments finis permet de modéliser ce phénomène, et les résultats de la simulation sont obtenus à l'aide du logiciel ANSYS. Cet article présente les résultats d'une comparaison entre un dissipateur thermique sans matériaux à changement de phase (MCP) et un dissipateur thermique avec MCP, afin de quantifier l'effet de la présence de MCP sur la gestion thermique des composants électroniques. Le N-Eicosane, dont la température de fusion est de 36,5 °C. Ces dissipateurs thermiques nécessitent généralement l'utilisation de techniques visant à améliorer le transfert thermique, en raison de la faible conductivité thermique des matériaux à changement de phase (MCP). Une matrice d'ailettes en plaques d'aluminium est utilisée dans la présente étude pour accroître le transfert thermique. Par conséquent, le matériau utilisé dans cette simulation diminue l'effet de surchauffe du dissipateur thermique (température maximal sans MCP : 69 °C - température maximal avec MCP : 61 °C).

ABSTRACT. Traditional cooling systems lack the ability to ensure efficient thermal energy transfer. The evolution of these systems has made it possible to improve new devices. This research demonstrates the effect of phase change materials (PCMs) on optimal thermal management using a heat sink. This type of material has the ability to absorb the thermal energy dissipated by electronic components. The material used is n-Eicosane, chosen for its physical and chemical properties. The finite element method is used to model this phenomenon, and the simulation results are obtained using ANSYS software. This article presents the results of a comparison between a heat sink without phase change materials (PCMs) and a heat sink with PCMs, in order to quantify the effect of the presence of PCMs on the thermal management of electronic components. N-Eicosane, whose melting point is 36.5°C. These heat sinks generally require the use of techniques to improve heat transfer, due to the low thermal conductivity of phase change materials (PCMs). An Aluminum plate fin array is used in this study to increase heat transfer. Therefore, the material used in this simulation decreases the overheating effect of the heat sink (maximum temperature without PCM: 69 °C - maximum temperature with PCM: 61 °C).

MOTS-CLÉS. Stockage d'énergie thermique, Dissipateur thermique, Matériaux à changement de phase (MCP), Gestion thermique, Point de fusion, Dissipateurs thermiques, Méthode des éléments finis (MEF), Enthalpie-porosité.

KEYWORDS. Thermal energy storage, Heatsink, Phase change materials (PCM), Thermal management, Melting point, Heat Sinks, finite element method (FEM), Enthalpy-porosity.

1. Introduction

Avec l'évolution rapide des systèmes électroniques embarqués, la demande de conceptions plus petites et plus compactes a considérablement augmenté. Cette tendance, si elle facilite le développement de dispositifs portables et hautement performants, présente également de nombreux défis, notamment en matière de gestion thermique. Les composants électroniques étant soumis à des densités de puissance croissantes et à des espaces confinés, une dissipation efficace de la chaleur devient un facteur critique pour garantir leur fiabilité et prévenir les dysfonctionnements potentiels.

Pour relever ces défis, l'intégration de solutions de refroidissement innovantes est devenue une priorité. Parmi celles-ci, les dissipateurs thermiques intégrant des matériaux à changement de phase (MCP) se sont révélés une voie prometteuse. Les MCP possèdent la capacité unique d'absorber et de restituer efficacement la chaleur lors de leur transition de phase entre l'état solide et l'état liquide. Cette caractéristique leur permet d'agir comme tampons thermiques, atténuant les pics de température et améliorant la stabilité globale du système.

Des études récentes ont exploré diverses avancées dans les stratégies de refroidissement à base de MCP pour les dispositifs électroniques. Par exemple, il a été démontré que les MCP enrichis en aérogel améliorent significativement l'efficacité de la dissipation thermique et réduisent la résistance thermique des composants électroniques compacts [TechXplore 24]. Par ailleurs, des chercheurs ont étudié l'application des MCP à la gestion thermique des batteries pour les technologies aérospatiales et automobiles de nouvelle génération, soulignant leur rôle dans l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la sécurité [Vin Bia 22].

Bien que le problème de la gestion thermique soit bien compris, la contribution de cette étude au corpus de recherche existant n'est pas encore clairement définie. Cette étude vise à fournir une analyse comparative complète de deux configurations de refroidissement : un dissipateur thermique conventionnel et un dissipateur thermique intégré à un MCP. Le comportement thermique de ces systèmes est modélisé à l'aide de la méthode enthalpie-porosité, une technique numérique parfaitement adaptée à la simulation du processus de changement de phase. En évaluant des indicateurs de performance clés, tels que l'efficacité de la dissipation thermique, la distribution de la température et la stabilité du système, cette analyse vise à mettre en évidence les avantages des dissipateurs thermiques à base des MCP pour la gestion des exigences thermiques des systèmes électroniques modernes.

Cette étude réside dans la comparaison directe de dissipateurs thermiques améliorés par MCP avec des conceptions conventionnelles dans des conditions de fonctionnement réalistes. Les résultats de cette étude devraient souligner le potentiel de la technologie MCP pour faire progresser les solutions de gestion thermique, ouvrant la voie à des conceptions plus fiables et durables dans le domaine de l'électronique embarquée. Face à la demande croissante de systèmes miniaturisés, des approches innovantes comme celles-ci joueront un rôle crucial dans l'avenir de l'électronique [K. EL 12]. Une étude récente a souligné les défis actuels liés à l'optimisation des performances des MCP, notamment en termes de stabilité des matériaux et de fiabilité des cycles thermiques à long terme, qui restent des domaines de recherche essentiels [Eli Rev 24].

2. Etat de l'art

La gestion thermique est un enjeu crucial dans le domaine des systèmes électroniques embarqués, où la miniaturisation et l'augmentation des densités énergétiques engendrent des défis majeurs. Les matériaux à changement de phase (MCP) représentent une solution innovante pour répondre à ces problématiques. Cette revue de pointe explore les recherches actuelles sur l'intégration des MCP dans les dissipateurs thermiques.

Les MCP sont largement utilisés pour leur capacité à absorber ou à restituer une grande quantité d'énergie thermique à température constante ou quasi-constante lors des changements de phase. Des études ont montré que ces matériaux peuvent maintenir la stabilité thermique tout en réduisant les pics de température dans les systèmes électroniques [RAJESH 14]. Des avancées récentes démontrent que les systèmes de refroidissement à base de MCP peuvent améliorer la longévité des dispositifs électroniques en atténuant les risques de surchauffe [Vin Bia 22].

Parmi les MCP couramment utilisés, les paraffines telles que le n-eicosane sont appréciées pour leurs propriétés thermophysiques avantageuses, notamment leur chaleur latente élevée et leur stabilité chimique.

Les dissipateurs thermiques jouent un rôle essentiel dans la dissipation de la chaleur générée par les composants électroniques. L'intégration de MCP dans ces dispositifs peut améliorer leurs performances thermiques. Par exemple, Rajabifar et al. ont utilisé des dissipateurs thermiques à micro-ailettes remplis de MCP nanoencapsulés pour démontrer une augmentation significative du transfert thermique. Les résultats indiquent que la conception du dissipateur thermique, notamment la disposition et la taille des cavités, a un impact direct sur l'efficacité thermique. Dans le secteur automobile, les dissipateurs thermiques à base de MCP sont explorés pour optimiser le refroidissement des moteurs et réduire la consommation énergétique globale [Adv Shu 24].

La géométrie des dissipateurs thermiques remplis de MCP influence fortement la convection naturelle et le mécanisme de fusion du MCP. Il a été démontré que des boîtiers de formes géométriques différentes peuvent optimiser les performances de refroidissement [K. EL 12]. Une étude récente montre que l'intégration de composites MCP à base d'aérogel améliore la dissipation thermique et le blindage micro-ondes, ce qui améliore l'efficacité des composants électroniques haute performance [TechXplore 24]. Les études montrent également qu'une répartition uniforme du MCP dans les cavités est essentielle pour éviter les points chauds.

La méthode enthalpie-porosité est couramment utilisée pour modéliser le comportement thermique des MCP dans les dissipateurs thermiques. Cette approche permet de capturer les étapes de fusion et de solidification tout en tenant compte des interactions thermiques entre les ailettes et le MCP. Des études récentes soulignent le potentiel de l'intégration du MCP pour la gestion thermique des batteries d'avions de nouvelle génération, garantissant des conditions de température stables pendant les vols [Eli Rev 24]. souligne que cette méthode offre une précision considérable tout en réduisant la complexité de calcul.

3. Présentation des matériaux à changement de phase

3.1. Définition

Les matériaux à changement de phase sont des substances qui ont la capacité de stocker (augmentation de température) et libérer (diminution de température) une grande quantité de chaleur, à une température constante, lors de son changement d'état physique à un autre.

3.2. Domaine d'application

Les matériaux à changement de phase ont été utilisés dans de nombreux domaines comme le secteur de textiles intelligents, de l'automobile, des installations d'énergie, l'industrie de la construction, le développement des systèmes de stockage d'énergie thermique dans le secteur électronique aussi.

3.2.1. Stockage thermique dans les bâtiments

Le stockage de l'énergie thermique pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments devient de plus en plus important en raison de la hausse du coût des combustibles fossiles et des préoccupations environnementales. En particulier, dans les zones extrêmement froides/chaudes, la consommation d'énergie électrique varie considérablement pendant la journée et la nuit, en partie à cause du chauffage/refroidissement des locaux domestiques. Une telle variation entraîne une période de charge de pointe et une période creuse [Yin Zha 07].

- Système de chauffage passif :

Les systèmes de chauffage et de refroidissement passifs utilisent des technologies ou des caractéristiques de conception pour chauffer ou refroidir les bâtiments sans dispositifs mécaniques actifs, en utilisant peu ou pas d'énergie externe [Hoy Yen 10]. Les études sur le stockage passif de l'énergie au Japon, aux États-Unis et en Allemagne pour chauffer les serres remontent aux années 1980. Les premières installations utilisaient le CaCl₂, suivies par Na₂SO₄, PEG et des paraffines. La

quantité de matériaux à changement de phase MCP par mètre carré de surface de serre et les températures de fusion variaient de 5 kg/m² à 85 kg/m². La plupart des applications étaient installées dans des serres à double vitrage ou avec un ou plusieurs écrans thermiques. Il a été démontré que les MCP pouvaient être utilisés pour le stockage d'énergie et le contrôle de l'humidité, permettant une gestion énergétique efficace avec une conception appropriée. Dans une étude détaillée, Feldman et al. [D. Feldman 96] ont imprégné des plaques de plâtre avec un mélange de palmitate de méthyle/stéarate de méthyle ayant un intervalle de fusion de 23 à 26,5 °C et une chaleur latente de transition de phase d'au moins 180 kJ/kg. Les résultats ont montré que les plaques de plâtre avec MCP pouvaient fonctionner efficacement comme milieu de stockage thermique pour le décalage de la charge de pointe. Zhang et al. [Dong Zhang 04] ont proposé une procédure en deux étapes pour produire du béton de stockage d'énergie thermique (TESC), qui a montré une capacité de stockage d'énergie comparable à celle d'un MCP commercial. Weinlader et al. [Hel Wei 05] ont étudié des panneaux de façade avec double vitrage combiné avec MCP, offrant un équilibre énergétique plus égalisé au cours de la journée et améliorant le confort thermique en soirée hivernale. Plusieurs autres études ont exploré l'efficacité des MCP dans les matériaux de construction, comme les murs et les planchers, démontrant des améliorations significatives dans la gestion thermique et le confort des occupants.

- Système de stockage actif:

Les systèmes de stockage actif sont principalement utilisés pour stocker l'énergie thermique pendant les heures creuses afin de réduire et de déplacer les charges de pointe vers la nuit, où l'électricité est moins coûteuse. Les matériaux à changement de phase MCP sont continuellement étudiés pour ces systèmes, notamment pour le chauffage par le sol et les appareils photovoltaïques. Lin et al. [Kunping Lin 05] ont développé un système de chauffage électrique au sol avec des plaques SSPCM (matériau à changement de phase stabilisé) composées de 75 % de paraffine et 25 % de polyéthylène. Ce système a maintenu la température des plaques à la température de transition de phase pendant une longue période après l'arrêt des radiateurs et a permis de transférer plus de 50 % de l'énergie thermique des heures de pointe vers les heures creuses.

Li et al. [Jianli Li 09] ont étudié un MCP à base de paraffine microencapsulée et de composite polyéthylène haute densité/farine de bois pour le chauffage électrique par le sol, montrant que l'efficacité dépendait du mode de chauffage et de l'épaisseur du MCP. Les MCP sont aussi utilisés pour réguler la température des appareils photovoltaïques (PV) intégrés aux bâtiments, dont l'efficacité diminue avec la chaleur. L'incorporation de MCP à température de changement de phase similaire à celle des PV améliore leur performance thermique. Une évaluation expérimentale a montré que les ailettes métalliques dans le conteneur MCP améliorent le transfert de chaleur.

Malvi et al. [C.S. Malvi 11] ont présenté un modèle combinant un système solaire thermique et photovoltaïque intégrant un MCP, utilisant différentes parties du spectre solaire pour augmenter l'efficacité des PV en réduisant leur température.

3.2.2. Chauffage/refroidissement de l'eau

Barba et Spiga [A Barba 03] ont analysé le comportement des hydrates de sel encapsulés pour le stockage de chaleur latente (LHS) dans un système de transfert de chaleur avec un ballon d'eau chaude sanitaire. Ils ont découvert que la solidification complète se produisait plus rapidement avec de petites capsules sphériques, un nombre de Jakob élevé et une conductivité thermique élevée. Cabeza et al. [C. Solé 08] ont étudié un ballon de stockage d'eau chaude à stratification contenant un module MCP composé de plusieurs cylindres, utilisant un composite granulaire MCP -graphite. Leurs expériences ont montré que l'immersion d'un module MCP dans un réservoir d'eau domestique permettait de fournir de l'eau chaude plus longtemps sans apport d'énergie externe.

Sole et al. [Muh Maz 09] ont testé la charge d'un réservoir d'eau et d'un réservoir d'eau MCP à différents débits, trouvant que l'introduction d'une petite quantité de MCP augmentait l'énergie stockée

de seulement 3 %. Ils ont également étudié l'utilisation de modules MCP dans un ballon d'eau chaude domestique stratifié, testant des mélanges de 80 % de paraffine et 20 % de différents acides gras (SA, PA et MA). Lors des expériences de réchauffage, ils ont constaté que 3 kg de MCP pouvaient augmenter la température de 14 à 36 litres d'eau dans la partie supérieure d'un ballon d'eau chaude de 3 à 4 °C en 10 à 15 minutes, les meilleurs résultats étant obtenus avec le SA comme MCP [Kin Pie 14].

3.2.3. Électronique

Les améliorations technologiques des appareils électroniques ont entraîné une fonctionnalité accrue et des facteurs de forme réduits, et ont concentré toujours plus de puissance dans des boîtiers toujours plus petits. En conséquence, la gestion thermique est devenue plus critique pour la conception réussie d'appareils électroniques tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les tablettes et les appareils photo numériques. De tels dispositifs ne fonctionnent normalement pas en continu pendant de longues périodes, de sorte qu'un système de refroidissement basé sur MCP présente un grand potentiel. Comme alternative à une technique de refroidissement passif, les dissipateurs thermiques basés sur MCP pourraient maintenir la température des appareils électroniques en dessous du niveau critique. Généralement, les températures maximales mondiales admissibles de diverses puces pour éviter les dommages dus à une surchauffe varient de 85 à 120. Tan et Tso ont mené une étude expérimentale sur le refroidissement des appareils électroniques mobiles tels que les assistants numériques personnels (PDA) et les ordinateurs portables en utilisant une unité de stockage de chaleur montée en interne remplie de n-eicosane MCP. Ils ont établi que la chaleur latente élevée du n-eicosane dans l'unité absorbait la dissipation thermique des puces et pouvait maintenir la température des puces dans un PDA en dessous de la température de service autorisée de 50 °C pendant 2 h de fonctionnement transitoire. Dans un autre développement, Krishnan et al. a proposé un dissipateur thermique hybride combinant un dissipateur thermique à ailettes à plaques actives avec sa pointe immergée dans un MCP passif. Des dissipateurs thermiques composites (CHS) utilisant un réseau vertical d'ailettes en MCP et un matériau de base hautement conducteur (BM) ont été construits par Akhilesh et al. L'effet de l'orientation des dissipateurs thermiques à base de MCP pour la gestion thermique transitoire des composants électroniques a été étudié par Wang et al. et leurs résultats calculés ont montré que l'orientation avait un effet limité sur les performances thermiques du système de refroidissement hybride. Kandasamy et coll. appliqué expérimentalement un nouveau package MCP pour la gestion thermique des appareils électroniques portables. Les résultats ont montré que la résistance thermique du dispositif et le niveau de puissance appliquée au boîtier MCP étaient d'une importance cruciale pour la conception d'un système de contrôle thermique passif. Dans une autre étude, un dissipateur thermique basé sur MCP pour la gestion thermique transitoire des dispositifs électroniques à boîtier plat en plastique (QFP) a été étudié. L'inclusion de MCP dans les cavités des dissipateurs thermiques a amélioré les performances de refroidissement par rapport aux dissipateurs thermiques sans MCP lorsque l'entrée le niveau de puissance était relativement élevé. Dans un autre travail, Yin et al. ont préparé un MCP composite à réponse thermique rapide en incorporant de la paraffine dans du graphite expansé. L'application du MCP composite au dissipateur thermique d'un dispositif électronique a amélioré efficacement les performances de résistance au choc d'un flux thermique élevé et a assuré une plus grande fiabilité et stabilité de fonctionnement. Les résultats expérimentaux ont montré que les coefficients de transfert de chaleur apparents du dissipateur thermique expérimental avec le MCP étaient jusqu'à trois fois meilleurs que ceux du dissipateur thermique sans MCP. Des composites de paraffine et de graphite expansé poreux ont également été utilisés comme matériau de support dans les systèmes de refroidissement électroniques et les résultats expérimentaux ont montré que les coefficients de transfert de chaleur apparents des systèmes composites étaient 1,25 à 1,30 fois supérieurs à ceux du système de refroidissement traditionnel. Il a été constaté que le dosage du matériau composite a un impact positif sur les performances du refroidissement électronique. Des études numériques de la convection thermique dans une enceinte rectangulaire chauffée par trois puces électroniques discrètes en saillie ont été réalisées. Il a été démontré que les MCP peuvent être utilisés pour absorber la chaleur émise par les appareils électroniques et que l'utilisation d'un MCP peut réduire la taille du système de refroidissement. Fok et all ont étudié expérimentalement le refroidissement

d'appareils électroniques portables en utilisant le n-eicosane comme MCP situé dans des dissipateurs thermiques avec et sans ailettes internes. Les résultats expérimentaux ont indiqué que l'utilisation de n-eicosane dans un dissipateur thermique en aluminium aide à stabiliser la température du système et prolonge la durée d'utilisation. Dans un autre développement, on a découvert qu'un module de caloduc utilisant du tricosane comme MCP peut réduire la consommation électrique du ventilateur jusqu'à 46 % et abaisser la température moyenne du chauffage de 12,3 °C par rapport à un appareil sans matériau de stockage thermique [Raj Bab 14].

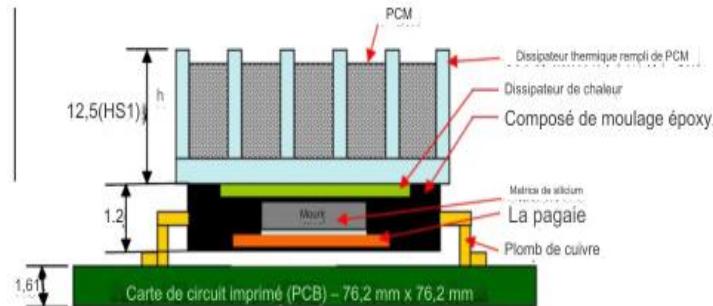


Figure 1. Schéma en coupe d'un dissipateur thermique rempli de PCM avec boîtier QFP

3.2.4. Secteur automobile :

Dans l'industrie automobile, les MCP sont utilisés pour préchauffer les pots catalytiques, les moteurs, améliorer le confort thermique des passagers et dans les moteurs à combustion interne.

Gumus a utilisé un TESS pour réduire les émissions de démarrage à froid des moteurs à combustion interne. Les émissions de CO et d'hydrocarbures ont diminué respectivement d'environ 64 % et 15 % grâce au préchauffage du moteur au démarrage à froid et pendant la période de réchauffement. Dans les travaux ultérieurs, un évaporateur et un régulateur de pression (EPR) utilisant un MCP pour stocker l'énergie thermique afin de surmonter les problèmes de démarrage à froid dans les véhicules alimentés au GPL ont été décrits. Il a été constaté que l'EPR avec MCP pouvait résoudre partiellement le problème de démarrage à froid des moteurs alimentés au GPL après une période d'attente. En outre, la faisabilité technique de l'utilisation d'un accumulateur de chaleur contenant un MCP avancé pour le refroidissement d'un moteur automobile a été explorée. Le nouveau concept consiste à stocker une plus grande quantité de chaleur dans l'accumulateur, ce qui pourrait contribuer à réduire la taille du système de refroidissement du moteur [Raj Bab 14].

3.3. Classification des types et des matériaux à changement de phase :

Le stockage d'énergie thermique (SET) est une technique permettant de stocker la chaleur en augmentant la température et de la libérer en cas de baisse de température. Le SET se réalise à travers trois formes principales de dissipation thermique, qui sont les suivantes :

- Le stockage par chaleur sensible
- Le stockage par chaleur latent
- Le stockage par chaleur des réactions

On s'intéresse sur le stockage par chaleur latent tant que leur utilisation des matériaux à changement de phases. Et aussi le stockage par chaleur sensible. la figure au-dessous montre ces types.

3.3.1. Le stockage par chaleur sensible

Dans le cas où la température d'un matériau augmente, l'énergie sera stockée sans changement de son état physique. La capacité de ces systèmes à stocker de l'énergie dépend de la capacité thermique spécifique du matériau, de la quantité de matériau et de l'ampleur du changement de

température. Les méthodes de transfert de chaleur comme le rayonnement, la convection et la conduction influencent et peuvent augmenter la température du matériau (voir Fig 2).

3.3.2. Le stockage par chaleur latente

Les systèmes de stockage de chaleur latente exploitent les changements de phase des matériaux (comme le passage de gaz à liquide ou de liquide à solide) pour absorber ou libérer de la chaleur. La quantité d'énergie stockée dépend à la fois de la masse du matériau utilisé et de sa chaleur latente de fusion, une propriété spécifique à chaque matériau liée à sa structure moléculaire. Ces matériaux, aussi appelés MCP, stockent de l'énergie par transition de phase, ce qui inclut à la fois la chaleur sensible et la chaleur latente (voir Fig 2).

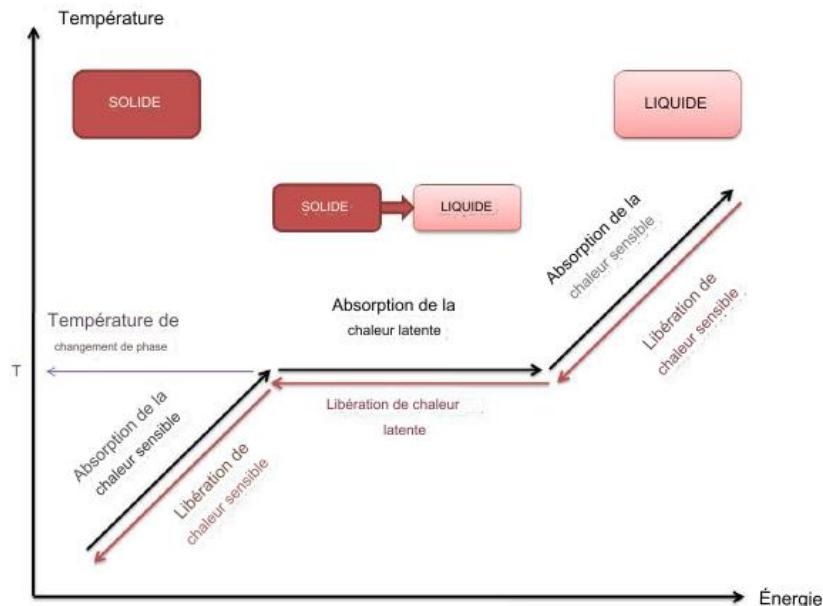


Figure 2. Chaleur latente et sensible

3.3.3. Les types des MCPs

Il existe une grande variété de composés utilisés comme matériaux à changement de phase pour de nombreuses applications différentes en raison de leurs différentes propriétés physiques et chimiques.

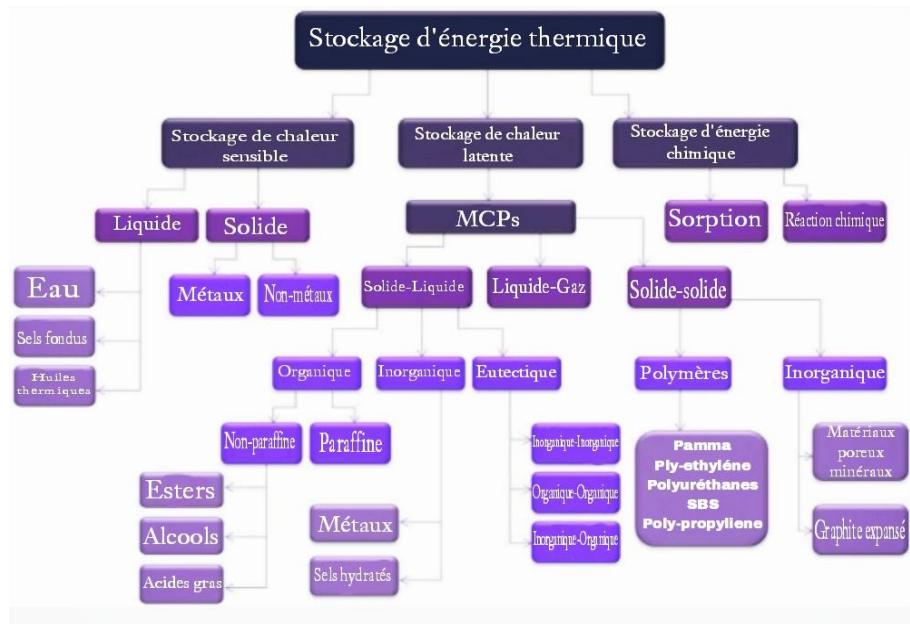


Figure 3. Classification des types et des matériaux de stockage d'énergie thermique

	Avantages	Inconvénients
MCPs organiques	<ul style="list-style-type: none"> -Large plage de température de changement de phase. Thermiquement stable - aucune dégradation. -Chimiquement inerte. -Non corrosif. -Processus de fusion congruent -pas de ségrégation de phase. Chaleur latente élevée. -Bonnes propriétés de nucléation. -Faible capacité de sous-refroidissement en phase liquide. -Variation de volume minimale. Compatible avec la plupart des matériaux de construction. -Recyclable. -Faible coût. 	<ul style="list-style-type: none"> -Faible conductivité thermique. -Faible densité. -Inflammabilité élevée.
MCPs inorganiques	<ul style="list-style-type: none"> -Conductivité thermique élevée. -Rendement énergétique élevé (enthalpie élevée). -Faible changement de volume pendant la transition de phase. -Ininflammable. 	<ul style="list-style-type: none"> -Phase de fusion incongrue ségrégation. -Mauvais nucléation. -Surfusion de la phase liquide. Corrosivité. -Toxicité. -Compatibilité limitée avec matériaux de construction. -Coût plus élevé.

Tableau 1. Avantages et inconvénients des matériaux à changement de phase organiques et inorganiques
Les critères de sélection du bonne MCPs

Le MCP idéal doit répondre à un certain nombre de critères liés aux propriétés thermophysiques, cinétiques et chimiques souhaitées [Raj Bab 14] dont les propriétés thermiques sont :

- Une température de fusion dans la plage de fonctionnement souhaitée,
- Une chaleur latente de transition de phase élevée par unité de volume,
- Une chaleur spécifique élevée, pour apporter un stockage thermique sensible supplémentaire important,
- Haute conductivité thermique des deux phases.

Et les propriétés physiques sont :

- Un petit changement de volume sur transformation de phase,
- Une faible pression de vapeur à la température de fonctionnement,
- Équilibre de phases favorable,
- Fusion congruente du matériau à changement de phase,
- Une haute densité.

Et les propriétés cinétiques sont :

- Pas de surfusion,

- Un taux de nucléation élevé,
- Un taux de cristallisation adéquat.

Et les propriétés chimiques sont :

- Stabilité chimique à long terme,
- Un cycle congélation/fusion totalement réversible,
- Compatibilité avec les matériaux de construction,
- Aucune influence de corrosion sur les matériaux de construction,
- Il doit être non toxique, ininflammable et non explosif pour garantir la sécurité

Le MCP devrait être facilement disponible en grande quantité à faible coût. En pratique, ces critères ne sont pas pleinement remplis par la plupart des MCP. Cependant, les progrès récents dans la conception et la caractérisation de nouveaux matériaux pour le stockage d'énergie, notamment les nanomatériaux, ont ouvert de nouvelles possibilités d'amélioration des performances avec des durées de vie prolongées.

4. Modélisation numérique d'un dissipateur thermique avec et sans MCP

4.1. Analyse par la méthode des éléments finis (MEF) de dissipateur thermique

Parmi les différentes méthodes utilisées pour modéliser les matériaux à changement de phase (MCP), la méthode des éléments finis (MEF) occupe une place importante grâce à sa précision et sa flexibilité. Cette technique repose sur la division du domaine d'étude en un réseau de petits sous-domaines, appelés éléments finis, interconnectés par des nœuds. Chaque élément est ensuite traité individuellement afin de résoudre les équations différentielles décrivant le comportement thermique, mécanique ou autre du matériau dans des conditions spécifiques.

La méthode des éléments finis (MEF) a été choisie pour cette étude car elle permet une modélisation précise et flexible de systèmes thermiques complexes, tels que ceux impliquant des matériaux à changement de phase (MCP). Contrairement à d'autres méthodes, la MEF peut facilement traiter les géométries irrégulières, les variations des propriétés des matériaux (changement de phase) et les conditions aux limites complexes. Elle permet également de simuler le transfert de chaleur dans des systèmes multidimensionnels, ce qui est essentiel pour évaluer avec précision les performances thermiques des dissipateurs thermiques et des composants électroniques. En résumé, la MEF est particulièrement adaptée pour traiter les détails complexes et non linéaires des phénomènes thermiques rencontrés dans ce type d'application. La méthode des éléments finis (MEF) permet de prendre en compte les variations locales des propriétés physiques du matériau, telles que la conductivité thermique ou la capacité calorifique, et d'étudier leur évolution au cours du temps. Elle est particulièrement adaptée à l'analyse de phénomènes complexes liés aux MCP, tels que la fusion et la solidification, qui impliquent des transferts de chaleur couplés à des changements d'état.

Dans le cadre de cette étude, la problématique abordée consiste à comparer différentes approches basées sur l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP). L'objectif est d'évaluer leurs performances en termes de stockage et de transfert de chaleur, ainsi que leur impact sur l'efficacité globale des systèmes dans lesquels ils sont intégrés [DELMAS 23].

4.2. Position du problème

Le problème étudié consiste à faire une comparaison entre l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCPs) [DEBICH 21].

Ce problème consiste résoudre l'équation de chaleur suivante :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + S_h$$

[1]

Tels que :

S_h : source de chaleur.

ρ : densité de l'aluminium ;

T : la température ;

λ : la conductivité thermique ;

C_p : la chaleur spécifique de fusion.

Pour modéliser les phénomènes de fusion et de solidification des matériaux à changement de phase (MCP), nous avons combiné la méthode enthalpie-porosité à la méthode des éléments finis (MEF). Cette approche permet de représenter avec précision les transitions de phase et les transferts de chaleur associés. La méthode enthalpie-porosité repose sur l'utilisation de l'enthalpie (H) comme variable principale, qui intègre à la fois la chaleur sensible et la chaleur latente du matériau. Cela permet de prendre en compte les effets thermiques liés au changement d'état, tels que le dégagement ou l'absorption de chaleur lors de la fusion ou de la solidification. Dans cette méthode, l'enthalpie est exprimée en fonction de la température, ce qui simplifie les calculs tout en conservant une bonne précision. Lorsqu'un matériau passe de l'état solide à l'état liquide (ou inversement), une zone de transition est définie, où les deux phases coexistent. La méthode de la porosité, quant à elle, introduit un facteur de porosité pour modéliser l'écoulement dans les zones où le matériau est partiellement fondu. Ce facteur varie en fonction de la fraction de liquide présente, permettant de représenter les propriétés thermiques et dynamiques du matériau en fonction de son état. En combinant ces deux méthodes avec la puissance de la méthode des éléments finis, il devient possible de discréteriser le domaine étudié en éléments finis et de résoudre les équations qui le régissent, telles que l'équation de conservation de l'énergie et les équations de Navier-Stokes modifiées pour les MCP. Cette approche offre une solution robuste pour analyser les processus thermiques complexes, prenant en compte les effets de conduction, de convection et de changement de phase dans un cadre uniifié. L'enthalpie dans ce cas s'écrit [Adv Shu 24] :

$$H = \int_{T_{ref}}^T C_p \cdot dT + \xi \cdot L_f$$

[2]

Tels que :

L_f : la chaleur latente de fusion du MCP ;

ξ : la fraction liquide.

Et l'équation de conservation d'énergie devient :

$$\rho \frac{\partial H}{\partial t} = \nabla(\lambda \cdot \nabla T) + S_h$$

[3]

Dans cet article, le modèle de dissipateur thermique est modélisé et étudié à l'aide d'ANSYS Multiphysics, un programme de simulation capable de simuler le régime transitoire afin de visualiser clairement l'effet du changement de phase. Cette étude vise à étudier l'impact des matériaux à changement de phase (MCP) sur la gestion thermique. ANSYS Multiphysics a été choisi pour cette étude en raison de ses capacités avancées de simulation multiphysique, qui permettent une modélisation précise des interactions thermiques et mécaniques complexes dans les dissipateurs

thermiques intégrant des matériaux à changement de phase (MCP). Parmi ses avantages, ANSYS offre une interface conviviale, des outils robustes pour le calcul du transfert de chaleur et la possibilité de simuler des phénomènes non linéaires, tels que les changements de phase, ce qui le rend particulièrement adapté à notre étude. Comparé à son code interne, ANSYS bénéficie de décennies d'expérience et d'optimisation, garantissant des résultats fiables, des gains de temps significatifs et un support technique, rendant son utilisation plus efficace et moins sujette aux erreurs.

4.3. Description du modèle

Le modèle de dissipateur thermique utilisé dans cette étude est basé sur le modèle Baby [Adv Shu 24], comprenant un réseau de cavités 4×4 . Deux configurations sont analysées : dans la première, les cavités sont laissées vides, tandis que dans la seconde, elles sont remplies d'un matériau à changement de phase (MCP). Le n-eicosane a été choisi comme MCP pour cette étude en raison de ses propriétés thermiques avantageuses, notamment une température de changement de phase adaptée, une capacité thermique latente élevée et une stabilité chimique, ce qui le rend particulièrement adapté à la gestion thermique des systèmes électroniques compacts. Bien qu'il existe d'autres MCP, le n-eicosane offre un bon équilibre entre conductivité thermique et efficacité de stockage d'énergie. Bien qu'une analyse comparative complète avec d'autres MCP n'ait pas été l'objectif principal de cette étude, son choix s'est appuyé sur des recherches antérieures soulignant son efficacité dans des applications similaires. Des travaux futurs pourraient explorer d'autres MCP à conductivité thermique améliorée pour une optimisation plus poussée. La représentation schématique du modèle est illustrée à la figure 4.

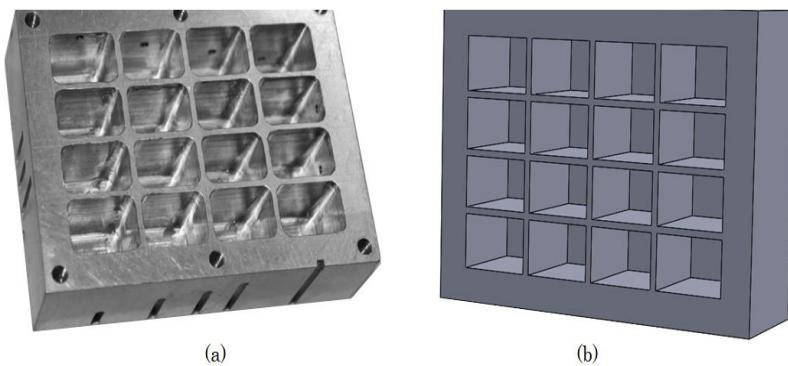


Figure 4. Dissipateur thermique (a) : photo réelle, (b) : modèle 3D

4.3.1. Géométrie du modèle étudier

La géométrie détaillée du dissipateur de chaleur est présentée dans la figure 5. Le dissipateur de chaleur à ailettes à plaques est en aluminium. Les propriétés des matériaux de chaque composant de l'assemblage sont mentionnées dans le tableau 2 [DEBICH 21].

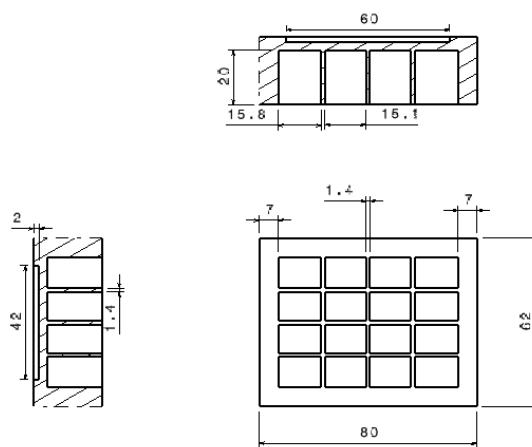


Figure 5. Dimension du dissipateur thermique étudié

4.3.2. Propriétés des matériaux

Matériaux	Conductivité thermique $[W/m.K]$	Chaleur spécifique $[KJ/kg.K]$	Chaleur latente $[KJ/kg]$	Point de solidification $^{\circ}C$	Point de fusion $^{\circ}C$	Densité $[kg/m^3]$
Aluminium	202.4	0.87	-	-	606.4	2719
n-Eicosane	0.39 (s)	1.9 (s)	237.4	35.5	36.5	810 (s)
	0.157 (l)	2.2 (l)	-	-	-	770 (l)

Tableau 2. Propriétés thermo-physiques des matériaux

Le système de refroidissement étudié sans MCP a été discréteisé en un nombre total de 24913 éléments, et pour l'autre cas le nombre d'éléments est de 24913. Comme le montre l'image ci-dessous.

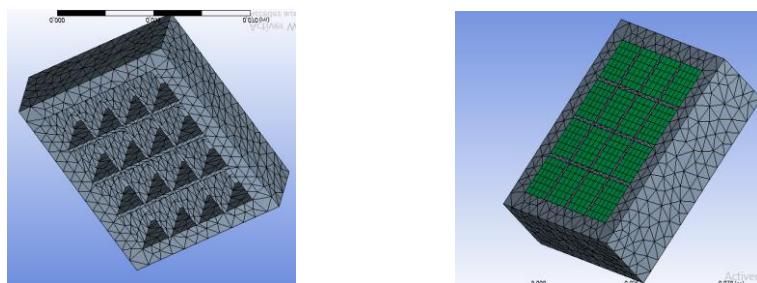


Figure 4. Maillage de dissipateur thermique (a) sans matériau à changement de phase (b) avec matériau à changement de phase

4.3.3. Conditions aux limites

Dans cette simulation, les conditions aux limites sont définies comme suit : les dimensions du dissipateur thermique sont spécifiées, à l'exception de la face supérieure. Une plaque chauffante est placée à la base pour reproduire la chaleur générée par le composant électronique. Le matériau utilisé est supposé isotrope et homogène, ce qui signifie que ses propriétés sont les mêmes dans toutes les directions. De plus, un équilibre thermique local est considéré entre les différentes phases en présence. Enfin, les propriétés thermophysiques du matériau sont supposées constantes, quelles que soient les variations de température ou l'état de la matière [Adv Shu 24].

- À $t=0$, la température est égale à la température ambiante $T = T_{am} = 27^{\circ}C$
- À $t=0$, le changement de phase (MCP) est à l'état solide, ce qui est représenté par $\xi = 0$
- coefficient d'échange thermique est 10 $W/m^2.^{\circ}C$
- flux thermique 1500W/m²

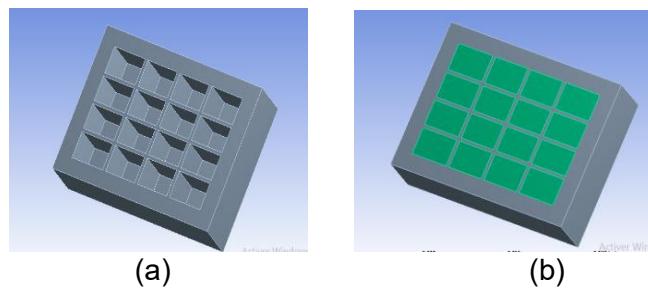


Figure 6. Dissipateur thermique sans et avec matériau à changement de phase sur ANSYS

Raffinement	Temperature max(°C)	NB des noeuds	NB des elements
1	61,834°C	94681	59656
2	61,778 °C	215202	135628
3	62,389 °C	408029	261244

Tableau 2. Etude de convergence du maillage

4.4. Les résultats obtenus par le logiciel ANSYS multiphasique

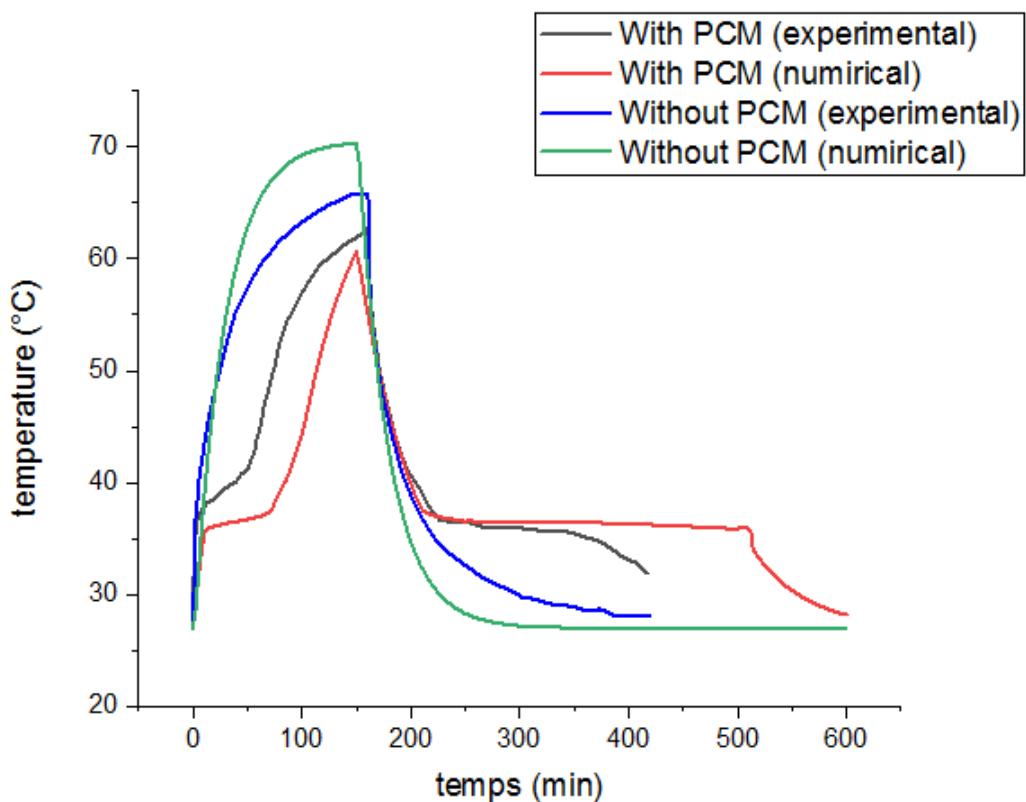


Figure 7. La variation de température avec le temps

4.5. Résultats et discussion

Courbe rouge pour le cas (sans matériau à changement de phase). Cette phase montre une montée en température (0-220 min), phase de charge. La température augmente rapidement au début pour

atteindre un maximum global d'environ 69 °C. Ceci indique un manque de régulation thermique, car il n'y a pas de matériau à changement de phase (MCP) pour absorber la chaleur. La courbe atteint une valeur de température maximale et atteint son pic avant de commencer à décroître.

Phase de décharge (220-350 min) : Après avoir atteint le pic, la température commence à décroître. Cette descente est relativement linéaire, ce qui signifie seulement qu'il y a un transfert de chaleur par conduction et convection. Après (350 min), la courbe se stabilise autour de 27 °C, marquant une température ambiante atteinte après dissipation thermique totale.

Courbe noire pour le cas de l'ajout de matériau à changement de phase « n-Eicosne », phase de charge (0-220 min). La courbe montre une montée plus lente que la courbe rouge. Dans ce cas, le matériau à changement de phase (n-Eicosne)吸 une partie de la chaleur appelée chaleur latente, ce qui ralentit la montée en température. La température maximale atteinte est d'environ 61 °C, soit 8 °C de moins que la courbe rouge, démontrant l'efficacité du MCP pour réduire le pic thermique.

Phase de décharge (220-350 mn) : Une fois la chaleur latente libérée, la courbe noire décroît plus rapidement que la courbe rouge. Ceci reflète l'effet de dissipation thermique du MCP, qui libère lentement la chaleur stockée lors du refroidissement. Après (350 mn), la température se stabilise également autour de 27 °C, suggérant que le système atteint finalement un équilibre thermique similaire à la courbe sans MCP.

L'étude présentée dans cet article consiste à comparer les deux dissipateurs thermiques avec son MCP. La comparaison porte sur la durée et l'amplitude du pic thermique, la phase de refroidissement et l'efficacité globale :

Pour le premier, avec MCP (courbe noire), le pic thermique est retardé et réduit (61 °C contre 69 °C sans MCP). Ceci illustre la capacité du n-Eicosne à réguler les températures élevées grâce à l'absorption de la chaleur latente lors de la fusion. Sans MCP, le pic est plus élevé et atteint plus rapidement, ce qui démontre une absence de contrôle thermique.

Deuxièmement, avec le MCP, la dissipation thermique est plus efficace grâce à la restitution progressive de la chaleur stockée. Il en résulte une baisse de température plus rapide après le pic.

Sans MCP, la baisse de température est plus lente, car il n'existe aucun mécanisme supplémentaire pour accélérer la dissipation thermique.

Dernièrement, l'utilisation du MCP réduit les températures maximales et ralentit la montée en température, limitant ainsi les risques de surchauffe et augmentant la stabilité thermique du système.

Sans MCP, le système est plus vulnérable aux variations rapides de température et aux pics thermiques plus importants, ce qui peut réduire son efficacité et sa durabilité.

5. Conclusion

Dans cet article, l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP), notamment le n-Eicosane, présente une solution innovante pour améliorer la gestion thermique des systèmes soumis à d'importantes variations de température. En combinant des méthodes de simulation avancées, telles que la méthode enthalpie-porosité et la méthode des éléments finis (MEF), nous avons pu modéliser avec précision les processus complexes de fusion et de solidification des MCP, le tout à l'aide du logiciel de simulation ANSYS Multiphysics. Ces outils numériques nous ont permis d'analyser en détail le comportement thermique des systèmes avec et sans intégration de MCP. Les résultats montrent clairement que l'utilisation de MCP joue un rôle important dans la régulation thermique. En absorbant une partie de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente lors de la fusion, les MCP peuvent limiter les pics thermiques tout en ralentissant la montée en température. Cette capacité à stabiliser les variations thermiques contribue à protéger les systèmes contre la surchauffe et améliore leur durabilité.

et leurs performances globales. De plus, lors de la phase de refroidissement, les MCP libèrent progressivement la chaleur emmagasinée, ce qui accélère la dissipation thermique et permet un retour plus rapide à une température stable. En revanche, les systèmes sans MCP présentent des limitations importantes, notamment une montée en température rapide et des pics thermiques plus élevés, indiquant une moindre efficacité de la gestion thermique. Ces résultats soulignent l'importance de l'intégration des MCP dans les applications nécessitant un contrôle thermique rigoureux, telles que l'électronique, le stockage d'énergie ou les systèmes de climatisation.

En conclusion, l'intégration des MCP représente une avancée significative dans le domaine de la gestion thermique. Cependant, des défis subsistent, notamment l'optimisation et la fiabilité des propriétés thermophysiques des MCP et leur adaptation à différentes conditions opérationnelles. Ces perspectives ouvrent la voie à de futures recherches visant à maximiser le potentiel des MCP dans diverses applications, contribuant ainsi au développement de solutions thermiques durables et performantes.

Bibliographie

- [TechXplore 24] Aerogel-based phase change materials improve thermal management and reduce microwave emissions in electronic devices, TechXplore, 2024. Available at: <https://techxplore.com/news/2024-04-aerogel-based-phase-materials-thermal.html>
- [Vin Bia 22] Vincenzo Bianco, Phase-change materials for thermal management of electronic devices," ScienceDirect, 2022. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431122007785>
- [K. EL 12] K. El Omari1, T. Kousksou, Y. Le Guer. Impact of shape of container on natural convection and melting inside enclosures used for passive cooling of electronic devices. Paper. University of Pau and the Pays de l'Adour (UPPA). France: Applied Thermal Engineering, 8 Jun 2012.
- [Eli Rev 24] Elisa Revelloa, Marco Boccacciob, Francesco Acerrac, Alessandro Monteverdea, Potential application of phase change materials for battery thermal management in next-generation aircraft, ICAS, 2024. Available at: https://www.icas.org/icas_archive/icas2024/data/papers/icas2024_0295_paper.pdf
- [RAJESH 14] Rajesh Baby, C. Balaji. Thermal performance of a PCM heat sink under different heat. International Journal of Thermal Sciences, 2014.
- [Adv Shu 24] Advik Shukla, How can phase change materials improve vehicle cooling systems for better motor efficiency and thermal management, ResearchGate, 2024. Available at: https://www.researchgate.net/publication/385086503_How_can_phase_change_materials_improve_vehicle_cooling_systems_for_better_motor_efficiency_and_thermal_management
- [RAJESH 14] Rajesh Baby, C. Balaji. Thermal performance of a PCM heat sink under different heat. paper. India: International Journal of Thermal Sciences, 2014.
- [DEBICH 21] Debich, Bessem. Modeling, Simulation, and Reliability of Phase Change Materials for Automotive and aeronautics.Modélisation, simulation et fiabilité des matériaux à changement de phase pour l'automobile et l'aéronautique. phD Thesis. Normandie Université, Génie mécanique, 2021.
- [DELMAS 23] DELMAS, Lysandre. Study of Phase Change Materials (PCM) in building rehabilitation,Analysis of the impact on summer comfort and energy consumption of solutions integrating PCMs. phd thesis. Lyon: ALTEREA, 2023.
- [Yin Zha 07] Yinping Zhang, Guobing Zhou, Kunping Lin, Qunli Zhang, Hongfa Di, Application of latent heat thermal energy storage in buildings," state-of-the-art and outlook. Build Environ 2007, p. 42: 2197–2209.
- [Hoy Yen 10] Hoy-Yen Chan, Saffa B. Riffat, Jie Zhu, Review of passive solar heating and cooling technologies, Renew Sust Energy Rev 2010, p. 14:781–789.
- [D. Feldman 96] D. Feldman, D. Banu, DSC analysis for the evaluation of an energy storing wallboard, Thermochim Acta 1996, p. 272: 243–251.
- [Dong Zhang 04] Dong Zhang, Zongjin Li, Jianmin Zhou, Keru Wu, Development of thermal energy storage concrete, Cem Concr Res 2004, p. 34: 927–934.
- [Hel Wei 05] Helmut Weinläder, Andreas Beck, Jochen Fricke, PCM-facade-panel for daylighting and room heating, Sol Energy 2005, p. 78: 177–186.

[Kunping Lin 05] Kunping Lin, Yinping Zhang, Xu Xu, Hongfa Di, Rui Yang, Penghua Qin, Experimental study of under-floor electric heating system with shape-stabilized PCM plates, Energy Build 2005, p. 37: 215–220.

[Jianli Li 09] Jianli Li, Ping Xue, Hong He, Wenyi Ding, Jinmin Han, Preparation and application effects of a novel form-stable phase change material as the thermal storage layer of an electric floor heating system., Energy Build 2009, p. 41: 871–80.

[C.S. Malvi 11] C.S. Malvi, D.W. Dixon-Hardy, R. Crook, Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material, Sol Energy 2011, p. 85: 1440–1446

[A Barba 03] A Barba, M Spiga, Discharge mode for encapsulated PCMs in storage tanks, Sol Energy 2003, p. 74:141–8.

[Luisa F. Cab 06] Luisa F. Cabeza, Manuel Ibáñez, Cristian Solé, Joan Roca, Miquel Nogués, Experimentation with a water tank including a PCM module, Sol Energy Mater Sol Cells 2006, p. 90: 1273–1282.

[C. Solé 08] C. Solé, Marc Medrano, Albert Castell, Nogués Miquel, Harald Mehling, Energetic and exergetic analysis of a domestic water tank with phase change material, Int J Energy Res 2008, p. 32: 204–214.

[Muhsin Maz 09] Muhsin Mazman, Luisa F. Cabeza, Harald Mehling, Miquel Nogues, Hunay Evliya, Halime Ö. Paksoy, Utilization of phase change materials in solar domestic hot water systems, Renew Energy 2009, p. 34: 1639–1643.

[Kinga Pie 14] Kinga Pielichowska, Krzysztof Pielichowski, Phase change materials for thermal energy storage, Progress in Materials Science, vol. 65, pp. 67-123, Aug 2014.

[Raj Bab 14] Rajesh Baby, C. Balaji, Thermal performance of a pcm heat sink under di_ erent heat loads: an experimental study, International Journal of Thermal Sciences, p. 79: 240-249, 2014.