

# Optimisation du transfert de chaleur dans les matériaux à changement de phase avec des ailettes : Approche Numérique et Expérimentale

Abderrahmane EL HANAFI<sup>1\*</sup>, Nicolas BLET<sup>1</sup>, Abdelhamid KHEIRI<sup>1</sup>, Benjamin REMY<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, F-54000 Nancy, France

\* (auteur correspondant : [abderrahmane.el-hanafi@univ-lorraine.fr](mailto:abderrahmane.el-hanafi@univ-lorraine.fr))

**Résumé** - Cet article étudie le comportement d'un système de stockage d'énergie thermique (TES) avec un matériau à changement de phase (PCM) avec intégration d'ailettes. Une validation du modèle numérique est effectuée en comparant l'évolution temporelle de la fraction liquide, calculée numériquement et déterminée à partir des mesures des champs de température, pour deux longueurs d'ailettes différentes. Un nombre adimensionnel est proposé pour analyser l'effet des ailettes sur le transfert de chaleur dans le milieu. Cette étude présente également quelques résultats sur l'évolution de la fraction liquide et du nombre de Nusselt. Les résultats montrent que malgré la faible conductivité du PCM, la convection et la conduction jouent toutes les deux un rôle clé dans le transfert de chaleur, leur importance dépendant de la longueur des ailettes.

## Nomenclature

$Bi$	nombre de Biot	$\beta$	fraction liquide
$h$	enthalpie sensible spécifique, J/kg	$\gamma$	coefficient d'expansion thermique, 1/K
$H$	enthalpie totale spécifique, J/kg	$\mu$	viscosité dynamique, mPa.s
$\Delta H$	enthalpie latente, J/kg.K	$\rho$	masse volumique, kg/m <sup>3</sup>
$L$	longueur des ailettes, mm		
$L_f$	enthalpie de fusion, J/Kg		
$\overline{Nu}$	nombre de Nusselt moyen		
$T$	température du MCP, K		
$u$	vitesse du liquide, m/s		

## 1. Introduction

Les matériaux à changement de phase sont utilisés dans les systèmes TES (stockage d'énergie thermique) pour stocker/libérer de la chaleur dans diverses applications à comportement intermittent telles que les bâtiments et l'énergie solaire. Ils peuvent être utilisés pour corriger les déséquilibres entre l'offre et la demande d'énergie et pour améliorer l'efficacité des systèmes de stockage d'énergie thermique [1] en raison leur capacité à stocker une grande quantité d'énergie thermique par unité de volume, ce que l'on appelle la "densité thermique élevée".

Bien que le principal avantage de ce type de matériau soit la densité thermique élevée, ils présentent une faible conductivité [2], qui affecte l'efficacité thermique du TES. De nombreuses méthodes ont été étudiées pour augmenter le taux de charge et de décharge en augmentant la conductivité thermique effective du MCP. Sari et al. [3] ont utilisé le graphite expansé pour améliorer la conductivité effective du MCP. Sciacovelli et al. [4] ont étudié l'amélioration des performances du MCP en ajoutant des ailettes sous formes Y. De plus, de nombreuses méthodes

ont été proposées dans la littérature pour améliorer la vitesse de fusion du MCP en ajoutant des nanoparticules ou en ajoutant des ailettes. Jin et al. [5] ont étudié numériquement l'effet de la direction des ailettes sur la distribution de la chaleur dans le MCP. Ces études ont été pour la plupart menées dans des conditions aux limites fixes. Certaines autres études numériques et expérimentales proposent différentes méthodes pour améliorer le transfert de chaleur dans l'environnement. Cependant, ces études n'ont pas prouvé le rôle central de la conduction et de la convection dans le stockage de chaleur global du MCP [6].

Dans ce travail, un banc expérimental et une modélisation numérique 2D sont présentés pour étudier le comportement dynamique d'un boîtier rectangulaire avec des ailettes intégrées au sein du MCP utilisé, la paraffine RT42®. L'effet de la longueur des ailettes est étudié pour optimiser l'efficacité de la conception du TES. Les résultats numériques sont comparés aux résultats expérimentaux pour validation. Ils peuvent ensuite être utilisés pour déterminer les températures et vitesses moyennes, pour observer l'interface solide-liquide et pour étudier la réponse du système à toute excitation limite particulière. Les améliorations du TES sont évaluées en analysant la fraction liquide du MCP à différentes longueurs.

## 2. Dispositif expérimental

Un banc expérimental a été conçu pour étudier simplement le stockage de la chaleur en MCP ainsi que la dynamique de stockage/déstockage. Le TES se présente sous la forme d'une cavité parallélépipédique de taille 84\*80\*20 mm (figure 1), avec la paraffine RT42® comme MCP. Les parois sont composées de plexiglas, car il présente une faible conductivité thermique, ce qui permet de négliger les pertes thermiques à travers les parois. Une plaque de téflon est utilisée pour mesurer le champ de température bidimensionnel sur l'une des faces larges ; le téflon a été choisi car il est semi-transparent dans l'infrarouge et sa conductivité thermique est faible et presque égale à celle du MCP. La finesse de cette plaque en téflon (2 mm) permet de considérer une plaque thermiquement mince (faible nombre de Biot  $Bi \approx 0.1 \ll 1$ ). Pour la mesure thermique des champs 2D, une caméra infrarouge est donc positionnée devant la plaque de téflon.

Deux cellules Peltier sont positionnées sur une plaque de cuivre sur un côté de la cavité. Grâce à une sonde PT100 placée sur cette plaque, la température imposée est commandée par un contrôleur PID, relié à l'ordinateur imposant le signal de température voulu. Pour maintenir le contrôle thermique des cellules Peltier, une boîte à eau en aluminium reliée à un thermostat est placée sur le côté opposé des cellules.

Deux types de plaques de cuivre peuvent être montées sur la cavité : une plaque lisse ou une plaque avec trois rainures, dans lesquelles des ailettes peuvent être insérées. Dans cette étude, deux longueurs d'ailettes ont été testées : une courte de  $L=25$  mm et une longue de  $L=60$  mm. L'épaisseur des ailettes est 2 mm. La température de la plaque de cuivre est fixée à 70 °C lors de l'étude de fusion du MCP.

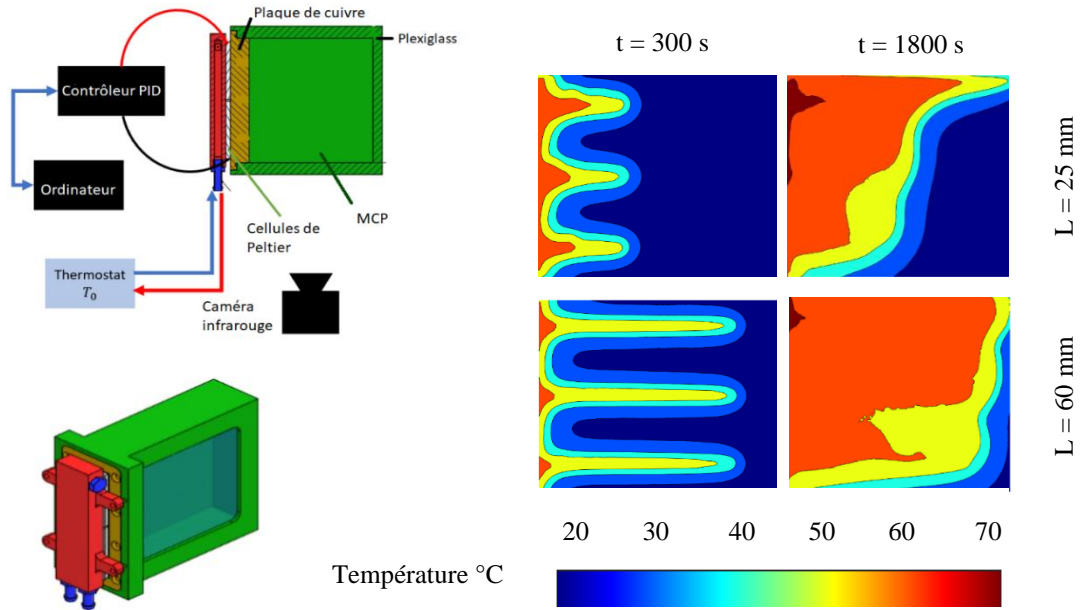


Figure 1 : Schéma du dispositif expérimental et champs de température mesurés

La fiche technique de fabrication [7] fournit les propriétés thermiques de la paraffine. Un densimètre à tube vibrant a été utilisé pour mesurer la densité de la phase liquide  $\rho$ . Cette mesure a été effectuée en fonction de la température, ce qui a permis de déterminer le coefficient de dilatation thermique ( $\gamma$ ). Le tableau 1 reprend les propriétés thermophysiques, considérées comme indépendantes de la température.

Paramètre	Valeur
Température de fusion (°C)	38-43
Chaleur latente de fusion (kJ/kg)	143
Capacité thermique spécifique (J/(kg.K))	2000
Conductivité thermique (W/(m.K))	0.2
Masse volumique du solide à 15°C (kg/m <sup>3</sup> )	880
Masse volumique du liquide à 70°C (kg/m <sup>3</sup> )	762
Coefficient de dilatation thermique (K <sup>-1</sup> )	0.0008

Table 1: Propriétés thermophysiques de la paraffine RT-42

### 3. Formulation mathématique du problème et modélisation

Une enceinte rectangulaire bidimensionnelle mesurant 84\*80 cm est modélisée sur Ansys Fluent. Elle comporte deux domaines : la plaque de cuivre avec les ailettes et la paraffine RT-42. Chaque paroi, à l'exception de celle de gauche, est considérée comme adiabatique. La température initiale du MCP est considérée égale à 25 °C. La température de la paroi en cuivre est fixée à 70 °C.

Pour simuler l'écoulement du fluide et le transfert de chaleur, le modèle "Enthalpie-porosité", proposé par Voller et Prakash [8], est utilisé pour simuler le changement de phase du MCP. Ce modèle permet de calculer la fraction liquide à chaque itération, sur la base du bilan enthalpique. La zone pâteuse est définie comme la région où la fraction liquide est comprise entre 0 et 1.

Elle est considérée comme un milieu pseudo-poreux, entre les deux phases liquide et solide. Un terme supplémentaire est également ajouté à l'équation de la quantité de mouvement pour imposer un gradient de pression régressif. Lorsque le matériau se solidifie, la porosité devient nulle et, par conséquent, la vitesse tombe également à zéro.

L'enthalpie du matériau  $H$  est calculée comme la somme de la chaleur sensible  $h$  et de la chaleur latente  $\Delta H$  :

$$H = h + \Delta H \quad (1)$$

La fraction liquide calculée  $\beta$  à chaque itération est définie selon la température :

$$\beta = 0 \text{ si } T \leq T_{solide}, \beta = 1 \text{ si } T \geq T_{liquide}, \beta = \frac{T - T_{solide}}{T_{liquide} - T_{solide}} \text{ si } T_{solide} < T < T_{liquide} \quad (2)$$

La chaleur latente est calculée en considérant l'enthalpie de fusion du matériau  $L_f$  :

$$\Delta H = \beta * L_f \quad (3)$$

L'équation de l'énergie s'écrit alors comme suit :

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} (H) + \rho_0 \nabla \cdot (\bar{u}H) = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (4)$$

avec  $u$  la vitesse du fluide et  $k$  la conductivité thermique.

Pour simuler la diminution de la quantité de mouvement dans la zone pâteuse, le terme  $-A(T)u$  est ajouté à l'équation de la quantité de mouvement de l'écoulement incompressible avec :

$$A(T) = \frac{(1-\beta(T))^2}{\beta(T)^{3+\epsilon}} A_{mush} \quad (5)$$

où  $A_{mush}$  est un coefficient qui contrôle la perméabilité de la zone pâteuse [9], égal à  $10^8$  dans le présent travail et  $\epsilon$  est un paramètre égal à 0.0001 pour éviter la division par zéro.

Les modèles d'écoulement bidimensionnel instable du transfert de chaleur pendant le processus de fusion du MCP sont régis par les hypothèses générales suivantes :

- Le fluide est newtonien et incompressible.

- L'écoulement est laminaire (nombre de Grashof  $Gr = \frac{\rho^2 * g * \beta * (T_C - T_F) * P^3}{\mu^2}$  autour de  $10^6$ , en dessous de la valeur critique  $10^9$ ).

- L'équation de la quantité de mouvement considère l'approximation de Boussinesq.

Ainsi, les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement s'écrivent :

$$\nabla \cdot (\bar{u}) = 0 \quad (6)$$

$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} (\bar{u}) + \rho_0 \nabla \cdot (\bar{u}\bar{u}) = \mu \nabla^2 \bar{u} - \nabla P + \rho g - A(T)\bar{u} \quad (7)$$

Le schéma SIMPLE est utilisé pour le couplage pression-vitesse et l'algorithme PRESTO est utilisé pour les corrections de pression. L'algorithme Upwind du second ordre est adopté pour la discrétisation des équations de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le résidu minimum est de  $10^{-4}$  pour l'équation de continuité,  $10^{-5}$  pour les équations de la quantité de mouvement et  $10^{-8}$  pour l'équation d'énergie. Après avoir analysé la convergence du maillage et du pas de temps, trois tailles de maillage différentes ont été testées : 0,3 mm, 0,24 mm et 0,2 mm. Suite à ces tests, la taille de maillage choisie pour l'étude numérique est de 0,24 mm. Concernant le pas de temps, deux valeurs ont été testées : 0,2 s et 0,1 s. le pas de temps de 0,2 s est choisi pour les simulations.

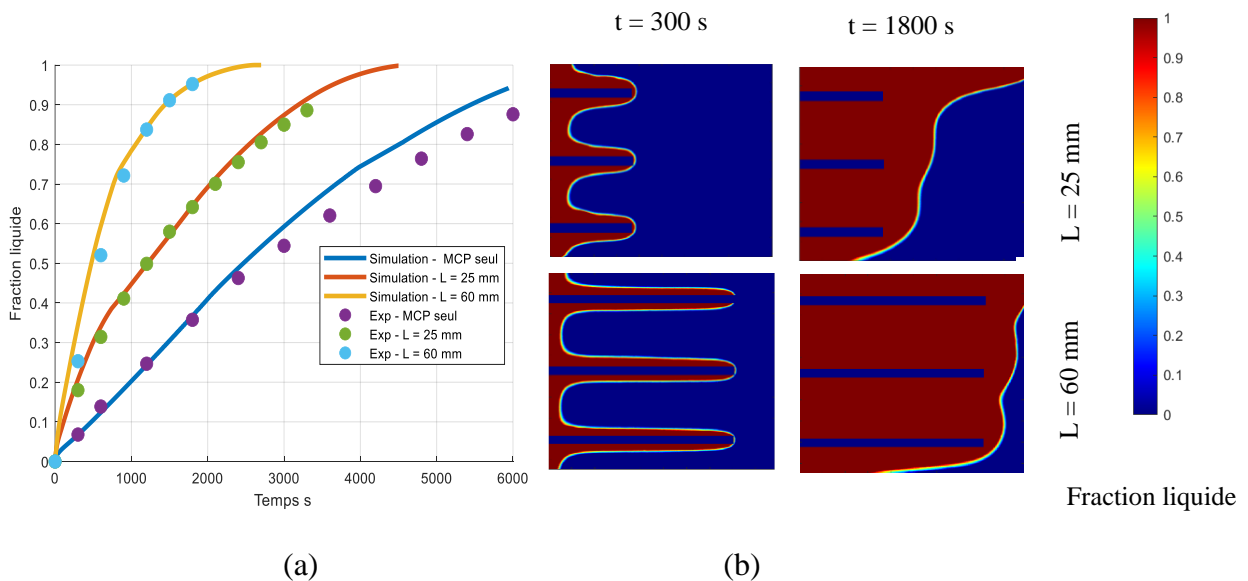
## 4. Résultats et discussion

### 4.1. Le processus de fusion avec et sans ailettes

La figure 2-a illustre l'évolution des fractions liquide expérimentales et numériques dans trois configurations distinctes (avec ou sans ailettes). La fraction liquide déterminée expérimentalement est obtenue en mesurant la température et en appliquant la relation température-fraction liquide (2). La matrice de fractions liquide obtenues numériquement permet de calculer la fraction liquide moyenne pour chaque temps.

Pour le premier cas, lorsque le MCP est chauffé sans introduction d'ailettes, le processus de fusion est relativement lent. Le MCP présente alors successivement différents modes de transfert de chaleur [10] :

- Régime conductif : Le front est parallèle à la paroi verticale.
- Régime conducto-convectif : Formation d'un point d'inflexion et d'une cellule de convection au-dessus de ce point.
- Régime convectif : une cellule de convection couvre l'ensemble du domaine, ce qui améliore le transfert de chaleur dans le MCP.



**Figure 2 :** (a) Fraction liquide totale numérique et expérimentale (b) Fraction liquide expérimentale

Les données expérimentales sont en bon accord avec les résultats numériques (figure 2-a), avec des temps de fusion plus longs car l'échange thermique avec l'environnement n'est pas complètement négligeable au niveau de la paroi droite de la cavité expérimentale. En revanche, le modèle numérique suppose des parois adiabatiques, ce qui conduit à un transfert de chaleur maximal vers le front de fusion dans le coin supérieur droit et crée ainsi des pics de la fraction liquide.

Dans les deux cas restants, deux longueurs différentes d'ailettes (25 mm et 60 mm) ont été ajoutées pour observer leur effet sur la fusion. Dans les deux cas (figure 2-a), le processus de fusion est accéléré parce que le cuivre fournit un chemin de transfert de chaleur préférentiel, augmentant le taux de fusion du MCP. Plus la longueur des ailettes augmente, plus la fusion est

rapide. Toutefois, ces données ne sont pas suffisantes pour distinguer les effets spécifiques de la conduction et de la convection dans chaque cas.

#### 4.2. Transport advectif *versus* transport diffusif

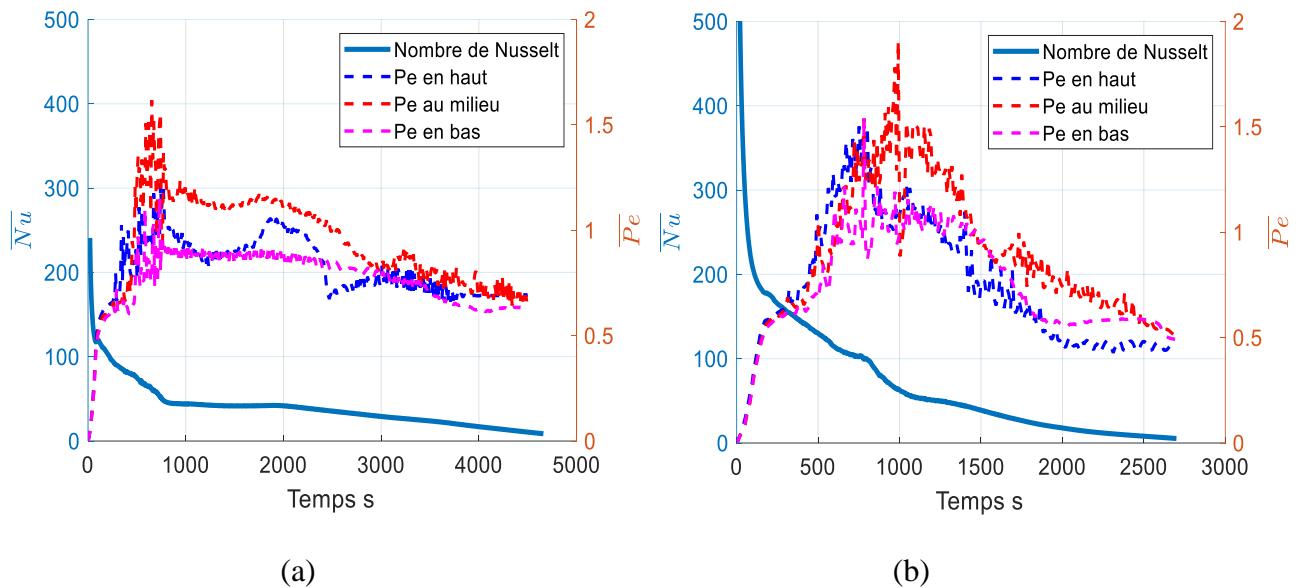
Pour comprendre les mécanismes de transfert de chaleur impliqués, le nombre de Nusselt est défini comme le flux dimensionnel sur la plaque de cuivre :

$$\overline{Nu} = \frac{1}{\lambda(T_C - T_F)} \int_0^1 \lambda \frac{\partial T}{\partial x^*} \Big|_{x=0} dy^* \quad (8)$$

Avec  $T_C$  est la température de la plaque de cuivre,  $T_F$  est la température de fusion et  $\lambda$  est la conductivité thermique du MCP.

Un nombre dimensionnel noté «  $\overline{Pe}$  » est en outre introduit pour représenter le rapport du transport advectif moyen volumique sur le transport diffusif moyen volumique lorsque le MCP est totalement liquide (Eq. (9)). Le nombre  $\overline{Pe}$  est calculé dans les trois régions fluides entourant chaque ailette. Ces régions fluides sont définies en divisant le domaine fluide uniformément et horizontalement.

$$\overline{Pe} = \frac{\int (\overline{u} \cdot \overline{grad}(T))_{T \geq T_F} dV}{\int (\alpha \cdot \Delta T)_{T \geq T_F} dV} \quad (9)$$



**Figure 3 :** (a) Nombre de Nusselt et  $\overline{Pe}$  pour les trois zones de chaque ailette pour différentes longueurs d'ailettes : - À gauche :  $L=25$  mm - À droite :  $L=60$  mm

Les deux nombres sont calculés à partir des résultats numériques et illustrés dans la figure 3.

Au début du chauffage, le nombre de Nusselt moyen est important pour les deux cas, car les ailettes permettent de réduire la résistance thermique du milieu. Il est plus élevé pour le cas des ailettes de 60 mm.  $\overline{Pe}$  est ici faible car la conduction domine le transfert de chaleur. Pour une longueur d'ailette de 25 mm, le nombre de Nusselt diminue et à 900 s, la convection commence à jouer un rôle clé dans le transfert de chaleur dans toutes les régions en raison de l'apparition d'instabilités de Rayleigh-Bénard entre les ailettes. Le rapport  $\overline{Pe}$  semble plus élevé pour la région centrale parce qu'elle subit deux circulations (de chaque côté de l'ailette). Les mêmes

commentaires peuvent être faits pour la deuxième longueur d'ailette avec un temps de régime transitoire autour de 1000 s. Ceci démontre que la longueur des ailettes n'induit pas de chute dans le transport convectif. De plus, malgré la faible conductivité du MCP, la diffusion de la chaleur joue toujours un rôle important dans le transfert de chaleur ( $\overline{Pe} < 2$ ).

Lorsque le front s'éloigne des ailettes, le nombre de Nusselt atteint un plateau comme dans le cas sans ailettes. Le niveau de ce plateau se maintient tant que le front ne touche pas la paroi droite. Ces commentaires sont également observés sur les valeurs de  $\overline{Pe}$  de 900 s à 1800 s pour les ailettes plus courtes : - dans la région inférieure,  $\overline{Pe}$  atteint un plateau de 0,8 correspondant à un transfert de chaleur légèrement plus diffusif. - dans la région médiane,  $\overline{Pe}$  reste stable au-dessus de 1, ce qui correspond à un transfert de chaleur légèrement plus convectif. - dans la région supérieure,  $\overline{Pe}$  est inférieur à 1, car toutes les circulations sont situées près de l'ailette centrale. Pour la deuxième longueur d'ailette, la longueur du plateau dure moins longtemps, entre 1000 s et 1200 s, car l'extrémité des ailettes est très proche de la paroi droite. Pour cette configuration, toutes les valeurs  $\overline{Pe}$  sont supérieures à 1, même pour la région inférieure, en raison de circulations convectives plus importantes.

Lorsque le front liquide-solide touche la paroi droite dans les deux cas, le nombre de Nusselt et les valeurs  $\overline{Pe}$  diminuent car la convection est plus faible (le système a alors un comportement similaire au cas sans ailette). Cependant, la baisse est plus importante pour les ailettes les plus longues car l'homogénéité de la température est plus rapide.

## 5. Conclusion

Dans ce travail, une cavité parallélépipédique remplie de MCP a été étudiée par mesure de la température et évaluation de la fraction liquide. Les données expérimentales présentées permettent de suivre le front liquide-solide du MCP et de mesurer les champs de température dans le milieu considéré. Pour valider le modèle CFD développé avec Ansys Fluent, ses résultats numériques ont été comparés avec les données obtenues à partir des expérimentations. L'analyse a mis en évidence les différents régimes de fusion sous l'effet d'une source thermique chaude.

Pour améliorer le système en termes d'inertie thermique, des ailettes métalliques ont été intégrées dans le matériau à changement de phase. Les simulations numériques ont permis d'étudier les performances du système lors du stockage. Les ailettes jouent un rôle clé dans la réduction de la résistance thermique du milieu en faisant fondre le MCP plus rapidement. En analysant leurs effets sur les régimes de transfert de chaleur, la conduction domine le transfert de chaleur pour les premières périodes de stockage, puis la convection joue un rôle clé en raison de la formation d'instabilités de Rayleigh-Bénard entre l'ailette et le front, en particulier dans la région centrale. Le rôle de la convection diffère selon la région et la longueur des ailettes. Le nombre de Nusselt présente le même comportement que le système sans ailettes, les temps de mode étant simplement raccourcis.

En ce qui concerne le déstockage, il est crucial de noter que la performance du système dépend principalement de la diffusion de la chaleur. Ce processus induit une dynamique plus lente et moins performante que lors du stockage, maintenant ainsi une récupération partielle de l'énergie, avec seulement 50 % de l'énergie du MCP récupérée dans les deux scénarios testés, indépendamment de la longueur des ailettes. Ces résultats soulignent l'importance de comprendre les différentes dynamiques thermiques pour concevoir et optimiser les systèmes à changement de phase avec des ailettes.

## Références

- [1] M. Karthikeyan and T. Ramachandran, “Review of thermal energy storage of micro- and nanoencapsulated phase change materials,” *Materials Research Innovations*, vol. 18, no. 7, pp. 541–554, 2014.
- [2] Fan L, Khodadadi JM. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15:24-46. DOI: 10.1016/j.rser.2010.08.007
- [3] N. Sarier, E. Onder, Organic phase change materials and their textile applications: An overview, *Thermochimica* <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.04.013>. Acta. 540 (2012) 7–60.
- [4] Sciacovelli, A., Gagliardi, F., & Verda, V. (2015). Maximization of performance of a PCM latent heat storage system with innovative fins. *Applied Energy*, 137, 707-715.
- [5] Ji, C., Qin, Z., Low, Z., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F. (2018). Non-uniform heat transfer suppression to enhance PCM melting by angled fins. *Applied Thermal Engineering*, 129, 269-279.
- [6] V.R. Voller, C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion 18 mushy region phase-change problems, *Int. J. Heat Mass Transf.* 30 (1987) 1709–1719.
- [7] Kasa Material Data Sheet, PCM RT42 (Rubitherm GmbH). Available online: <https://www.rubitherm.eu/index.php/produktkategorie/organische-pcm-rt>
- [8] Jany, P.; Bejan, A. Scaling theory of melting with natural convection in an enclosure. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1988, 31, 1221–1235.
- [9] M. Fadl, P. C. Eames, Numerical investigation of the influence of mushy zone parameter Amush on heat transfer characteristics in vertically and horizontally oriented thermal energy storage systems, *Thermal Engineering* V. 151 (2019) 90-99
- [10] A. EL HANAFI et al., Study of the thermal dynamic behavior of a tes system with PCM in a rectangular enclosure, Proceedings of the 17th International Heat Transfer Conference, IHTC-17

## Remerciements

Cette recherche a été soutenue par le projet Stock'NRJ financé par Fonds européen de développement régional (FEDER).