

# Analyse numérique de l'effet de l'intensification des transferts thermiques par extension de surface sur les cinétiques de fusion/solidification d'un MCP dans un échangeur-stockeur tube-calandre

Appolinaire KABORE <sup>1,2\*</sup>, Jules Voguelin SIMO TALA <sup>1</sup>, Zohir YOUNSI <sup>3</sup>, Daniel BOUGEARD <sup>1</sup>

<sup>1</sup> IMT Nord Europe, Institut Mines – Télécom, Univ. Lille, CERI Energie et Environnement  
F-59000, Lille, France

<sup>2</sup> Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie  
20 avenue du Grésillé- BP 90406, 49004 Angers Cedex 01 France

<sup>3</sup> Univ. Lille, Institut Mines-Télécom, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 – LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement  
F-59000, Lille, France

\*(auteur correspondant : appolinaire.kabore@imt-nord-europe.fr)

**Résumé** - La présente étude porte sur des études numériques de validation de la modélisation du changement de phase avec le code commercial STARCCM+, à travers des résultats de la littérature. Une application des modèles est faite en analysant l'influence des extensions de surface et de leur redistribution à iso-surface d'échange dans un échangeur tube-calandre de stockage latent sur les cinétiques de fusion/solidification. Les résultats montrent que le temps de fusion peut être réduit de 69 % dans la configuration optimale. L'application visée est le développement d'un échangeur-stockeur pour l'amélioration du confort thermique dans l'habitat.

## Nomenclature

$C_p$  Capacité calorifique, J/kg.K  
 $g$  Accélération de la pesanteur, m/s<sup>2</sup>  
 $H$  Enthalpie totale massique, J/kg  
 $h$  Enthalpie sensible massique, J/kg  
 $L$  Chaleur latente, J/kg  
 $p$  Pression, Pa  
 $t$  Temps, s  
 $T$  Température, K  
 $V$  Vitesse, m/s  
*Symboles grecs*

$\rho$  Masse volumique, kg/m<sup>3</sup>  
 $\mu$  Viscosité dynamique, Pa.s  
 $\beta$  Coefficient d'expansion volumique, 1/K  
 $\lambda$  Conductivité thermique, W/m.K

### *Abréviations*

*MCP*: Matériau à changement de phase

*HTF*: Fluide de transfert

*UFF*: User's fields functions

### *Indices et exposants*

$s, l$  solidus, liquidus

## 1. Introduction

La production, la conversion, le stockage et la gestion de l'énergie font de nos jours l'objet de plusieurs travaux de recherche, dans le but d'améliorer l'efficacité énergétique des systèmes, et de répondre aux besoins de sauvegarde de l'environnement. Dans le cas de l'énergie thermique, le stockage se fait principalement sous trois formes à savoir une forme sensible, une forme latente et une forme thermo-chimique. Les systèmes de stockage latent en utilisant des matériaux à changement de phase (MCP) apportent une solution au problème connu du stockage sensible grâce à une densité de stockage bien plus importante, et une meilleure maîtrise

des niveaux de température. Une problématique très importante du stockage latent est la faible conductivité des MCPs, qui entraîne des cycles de charge et décharge très longs, conduisant parfois à la réduction de la taille des systèmes et donc les capacités de stockage. Une des solutions et la plus utilisée, est l'intensification des transferts thermiques par l'utilisation d'ailettes, et plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens. Cependant très peu de chercheurs s'intéressent à l'optimisation des ailettes en prenant en compte des contraintes de surfaces ou de volume des matériaux. Hassan et al [1] réalisent une étude expérimentale comparative des ailettes radiales et longitudinales à iso-volume de MCP et d'ailettes, et leur impact sur les temps de fusion/solidification d'un MCP paraffinique dans une configuration verticale. Leurs résultats montrent une meilleure performance pour la configuration avec des ailettes radiales, qui présente une réduction du temps de charge de 66 % par rapport à la géométrie tube nu, contre une réduction du temps de charge de 55 % pour la géométrie avec des ailettes longitudinales. Dekhil et al [2] en utilisant de l'eau comme MCP dans un échangeur en configuration horizontale montrent qu'à surface d'échange égale, l'utilisation d'ailettes de grande taille en petit nombre est plus efficace que les ailettes de petite taille en grand nombre surtout si l'on envisage une fusion/solidification complète. Les études numériques sont les plus présentes dans la littérature et le modèle enthalpie-porosité généralisé proposé par Voller et al [3] en 1991, qui est implémenté dans des logiciels comme STARCCM+ [4] est l'un des plus utilisés. La mise en place des études numériques requiert une bonne connaissance d'un grand nombre de paramètres comme les propriétés thermophysiques des MCPs. L'analyse de la littérature montre un manque important de données expérimentales facilement exploitables numériquement à cause de l'absence de plusieurs données empêchant la reproduction des résultats. Quelques papiers exploitables ont été néanmoins repérés en plus de benchmark numérique permettant de valider les modèles numériques de changement de phase. Hannoun et al [5] proposent en 2005 un benchmark de validation de la modélisation du changement de phase avec une prise en compte de la convection naturelle en utilisant de l'étain comme MCP. Cependant, l'étain utilisé dans leurs travaux est un corps pur et les résultats sont purement numériques sans références expérimentales. Longeon et al [6] ont étudié expérimentalement la fusion/solidification d'un MCP paraffinique (RT35) dans un échangeur tube-calandre en configuration verticale. Ils s'intéressent notamment à l'impact de la configuration de l'injection du fluide de transfert (HTF) sur la convection naturelle et le transfert thermique dans le MCP. Cependant, l'impact de la convection naturelle a été étudié pour des dimensions de section figées, et sans prise en compte des échanges thermiques avec le milieu ambiant. Dans cette étude nous qualifions dans un premier temps une approche numérique développée avec le logiciel STARCCM+ en comparant des résultats obtenus avec ceux de la littérature. Ensuite nous déterminons dans une configuration verticale d'échangeur-stockeur de type tube-calandre la meilleure répartition et géométrie d'ailettes afin d'optimiser la dynamique du stockage/déstockage de chaleur.

## **2. Formulation mathématique, domaines d'études et conditions limites**

### **2.1. Formulation mathématique**

Les équations de conservation sont utilisées pour modéliser le comportement des MCPs et des fluides caloporteurs dans le temps et dans l'espace. Les hypothèses considérées ici sont :

- Ecoulements incompressibles, instationnaires et laminaires du HTF et du MCP
- Emploi de l'approximation de Boussinesq dans le MCP liquide
- MCP se présentant sous les états liquide, solide, et pâteuse encore appelé "mushy zone"
- Négligence de l'expansion volumique et de la dissipation visqueuse
- Propriétés thermophysiques des matériaux excepté le MCP considérées constantes dans

la plage des températures de fonctionnement

— Propriétés thermophysiques du MCP dépendant uniquement de la température.

Sous ces hypothèses, les équations de conservations s'écrivent :

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} \beta (T_{ref} - T) + \vec{S}_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla (\vec{V} h) = \nabla \left( \frac{\lambda}{\rho C_p} \nabla h \right) \quad (2)$$

$$H = h + \Delta H \quad (3)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (4)$$

$$\gamma(T) = \begin{cases} 0 & \text{si } T < T_s \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s} & \text{si } T_s \leq T \leq T_l \\ 1 & \text{si } T_l < T \end{cases} \quad (5)$$

$$\vec{S}_m = A_{mush} \frac{(1 - \gamma)^2}{\gamma^3 + \epsilon} \vec{V} \quad (6)$$

Les équations 1, 2 et 3 sont respectivement les équations vectorielles de conservations de masse, de quantité de mouvement et d'énergie en 3D, résolues dans tout le domaine d'étude.  $\vec{S}_m$  est un terme source rajouté à l'équation de quantité de mouvement pour modéliser le changement de phase et le mouvement du MCP fondu. Ce terme source dépend de la fraction liquide  $\gamma$  qui dépend de la température et prend des valeurs situées entre 0 et 1.  $A_{mush}$  est la constante de Carman-Kozeny, un coefficient expérimental qui reflète la morphologie de l'interface solide-liquide et la netteté du changement de vitesse dans la mushy zone. Sa valeur est assez souvent comprise entre  $10^4$  et  $10^9$  selon Yang et al., et un calcul de la distance inter-dentrite dans la "mushy zone" est fait en utilisant la relation démontrée par Yang et al. [7].  $\epsilon$  est un coefficient numérique très petit pour éviter toute division par 0 [2, 4]. Le terme source de flottabilité a été implémenté dans le code de calcul à travers l'utilisation de fonction utilisateur "UFF".

## 2.2. Domaines d'étude

Deux cas de qualification de la méthodologie numérique sont étudiés dans ce papier : un cas expérimental, et un cas numérique servant de benchmark numérique. La géométrie étudiée dans le benchmark proposé par Hannoun et al. [5] et représenté dans la figure 1 consiste en une cavité carrée 2D remplie d'étain pure à sa température de fusion  $T_f$ . Les parois gauche et droite sont différentiellement chauffées et on observe la fusion de l'étain. L'étain a été considéré comme un matériau non pure avec une plage de transition étroite  $T_l - T_s = \epsilon$ , avec  $\epsilon = 0.025^\circ\text{C}$ . La deuxième configuration, étudiée par Longeon et al. [6] et représentée sur la figure 2 est constituée de deux tubes concentriques de 400 mm de longueur, de diamètres intérieurs 15 mm et 44 mm.

Une application de la méthodologie numérique est ensuite faite sur l'analyse de l'impact des ailettes et leur redistribution sur les cinétiques de fusion/solidification d'un MCP. Pour ce faire 5 configurations de géométries d'échangeurs ont été analysées. Une première géométrie appelée géométrie de référence, principalement formée de deux tubes concentriques de longueur 301 mm, de diamètres intérieurs 30 mm, 102 mm et d'épaisseur 1 mm, avec un MCP bio-sourcé, PureTemp 23 (PT23) remplissant l'espace annulaire. Une grande ailette radiale permet de compartimenter chaque configuration en deux de sorte à avoir une convection naturelle laminaire.

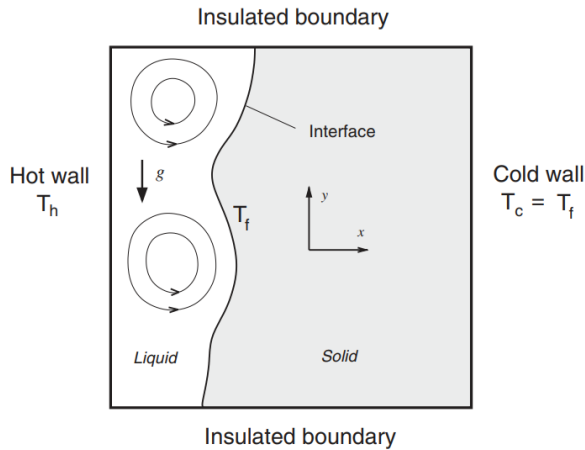


Figure 1 : Géométrie d'étude de l'étain [5]

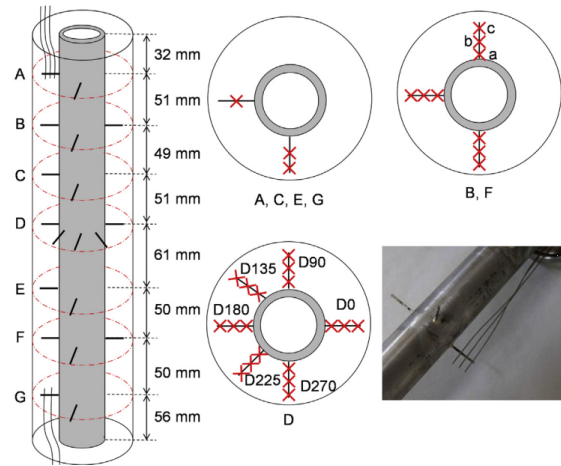


Figure 2 : Géométrie d'étude du RT35 [6]

Le tube central et les ailettes sont en cuivre. Quatre géométries sont dérivées de la géométrie de référence en augmentant la surface d'échange par des ailettes radiales, de sorte que la surface d'échange dans les 4 configurations soit le double du cas de référence. La surface d'échange est constante pour les configurations intensifiées, seuls changent la redistribution des ailettes et la localisation dans la calandre. Les études sont faites dans une configuration verticale, permettant d'utiliser une simplification 2D axisymétrique. Les 5 géométries représentées sur la figure 9 sont dénommées par REF, R4, R4B, R8, R8B pour désigner respectivement géométrie de référence, géométrie à 4 ailettes radiales équidistantes centrées, géométrie à 4 ailettes radiales décentrées bas, géométrie à 8 ailettes radiales équidistantes centrées, et géométrie à 8 ailettes radiales décentrées bas. Les propriétés thermophysiques des différents MCPs utilisés sont consignés dans le tableau 1. Les constantes de la mushy-zone sont considérées en référence à littérature,  $10^{15}$  pour l'étain comme recommandé par Hannoun et al. [5],  $10^6$  pour le RT35 comme utilisé par Pu et al. [8] et  $10^6$  pour le PT23 en référence aux MCPs paraffiniques comme le RT35, et valeur par défaut proposée dans la documentation du code de calcul utilisé.

	$T_{s/l}$ °C	$L$ kJ.kg <sup>-1</sup>	$\rho_{s/l}$ kg.m <sup>-3</sup>	$\beta$ K <sup>-1</sup>	$C_{p_{s/l}}$ J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	$\lambda_{s/l}$ W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	$\mu$ Pa.s
Etain	505	$6.10^4$	$7,5.10^3$	$2,67.10^{-4}$	200	60	$6.10^{-3}$
RT35	32/38	157	880/760	$1.10^{-3}$	1800/2400	0,2	$2,5.10^{-3}$
PT23	22,3/25,6	197,9	910/830	$12,16.10^{-3}$	1840/1990	0,2 5/0,15	$3.10^{-3}$

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques des MCPs utilisés

### 2.3. Conditions aux limites et initiales

Les différentes conditions aux limites et initiales de chaque étude sont données ci-dessous.

- Pour le cas de la fusion de l'étain, les parois haute et basse sont considérées adiabatiques. Sur la paroi droite on impose une température froide  $T_c = 505$  K. Le MCP est considéré initialement solide à sa température de fusion  $T_f = 505,0125$  K, soit une surfusion de 0,0125 K sur la paroi droite. A l'instant  $t = 0$ , on impose une température  $T_h = 508$  K.
- Dans le cas de l'étude de la fusion du RT35, le système est considéré adiabatique. L'injection du HTF se fait par le haut à température constante de 52 °C. Le débit d'injection est aussi constant et correspond à une vitesse de 0,01 m/s. Le MCP est initialement à l'état solide, et tout le système est considéré à une température de 22 °C.
- Dans le cas de la fusion du PT23, nous faisons l'hypothèse d'un débit suffisamment

grand, afin de négliger le gradient de température axial le long du tube caloporteur. Nous imposons donc un température de 40 °C sur la paroi intérieure du tube, et le système est initialement à la température de 0,25 °C en dessous de  $T_i$  du PT23 soit 22 °C.

## 2.4. Procédure numérique

Le code commercial STAR-CCM + V15.04 [5] a été utilisé pour résoudre les équations de conservation ci-dessus, basées sur une méthode de discrétisation en volumes finis. Les équations de conservation ont été résolues séquentiellement à l'aide du solveur algébrique AMG et de l'algorithme SIMPLE pour le couplage pression-vitesse. Une discrétisation du second ordre a été choisie pour les termes convectifs des équations de quantité de mouvement et d'énergie ainsi que pour la discrétisation temporelle. Dans le cas de la qualification avec les résultats de Hannoun et al. [5], les auteurs ont proposé un maillage et un pas de temps issus d'études de sensibilité des résultats à ces paramètres. Un maillage de  $400 \times 400$  et un pas de temps de 0,05 ont été choisis. Les résidus normalisés sont inférieurs à  $10^{-3}$  pour l'équation d'énergie, et à  $10^{-9}$  pour la continuité et la quantité de mouvement. Dans le cas de la qualification de la méthodologie à partir des résultats expérimentaux de Longeon et al. [6] et l'application aux ailettes, des études de sensibilité au maillage et au pas de temps ont été réalisées et un maillage correspondant à une taille de cellule de 1 mm et un pas de temps de 0.25 s ont été adoptés en analysant les évolutions des flux thermiques et fraction liquide. Une convergence des résidus a été observée avec des résidus normalisés inférieurs à  $10^{-5}$  pour l'équation d'énergie, et de  $10^{-10}$  pour la continuité et la quantité de mouvement. Ce maillage et ce pas de temps permettent d'avoir un bon compromis entre la précision de calcul et le coût numérique.

## 3. Résultats

### 3.1. Résultats de qualification de la méthodologie numérique

Dans le cas d'étude de Hannoun et al. [5], sous l'action du gradient de température entre la paroi chauffée et le MCP, il s'effectue un transfert thermique vers le MCP, qui augmente sa température et le fait fondre. La figure 3 présente l'évolution de la fraction liquide dans le temps de la solution de référence superposée à la solution obtenue avec notre code de calcul. On observe une quasi-superposition entre les résultats du benchmark et la présente étude avec un écart relatif de fraction liquide inférieur à 0.4 %. Sous l'action de la convection naturelle, le MCP plus chaud s'élève dans la cavité, se refroidit, puis redescend créant ainsi des cellules de recirculation de type Rayleigh-Bénard. La figure 4 montre l'évolution des lignes de courants colorées par la vorticité à deux instants différents, 200 s et 700 s. Qualitativement nous observons une importante similarité dans la structure de l'écoulement entre les deux résultats. Les modèles utilisés sur STARCCM+ permettent ainsi une reproduction très fidèle des résultats numériques de benchmark.

Dans le cas de l'étude de la fusion du RT35, la figure 5 présente l'évolution de la température dans le MCP en trois points, B, D, F suivant l'axe des cylindres, visibles sur la figure 2. Les résultats de la présente simulation montrent une bonne prédiction des tendances des courbes d'évolution des températures locales. une bonne précision est observée sur la plupart des points, avec un écart maximal de 4 °C observé en un seul point. La figure 6 présente l'évolution de la température de sortie du fluide de transfert. Une bonne précision est également observée quantitativement, avec un écart maximal inférieur à 2°C entre les résultats numériques et expérimentaux. Ces écarts observées peuvent en partie être attribués à la condition d'adiabaticité utilisée dans la démarche numérique, d  e aux manques d'informations dans l'étude expérimentale de Longeon

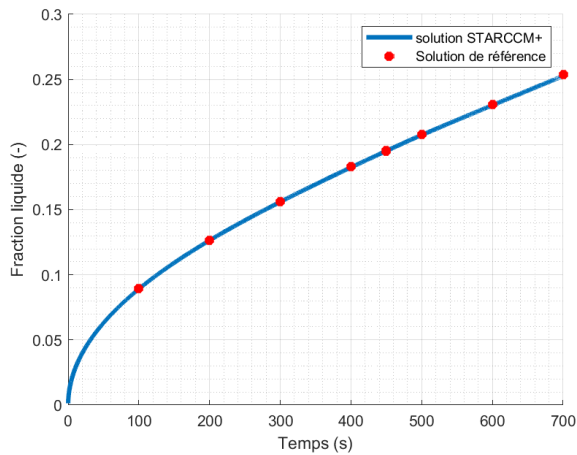


Figure 3 : Evolution de la fraction liquide dans le temps

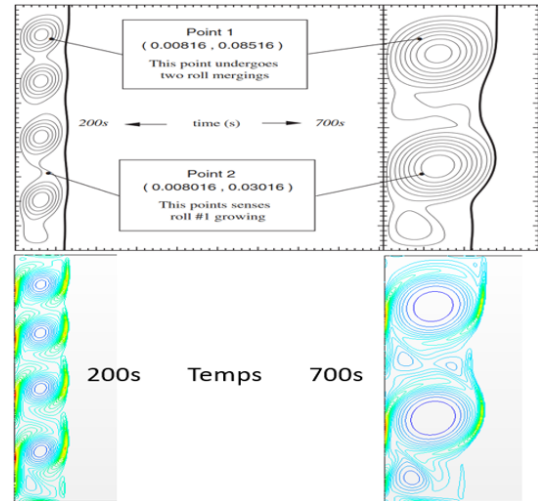


Figure 4 : Evolution de la structure de l'écoulement dans le temps

et al. [6], sur le coefficient d'échange, les températures extérieures et de parois. De plus il y a les éventuelles variations dans les propriétés thermophysiques des MCPs qui sont parfois fournies avec des écarts importants.

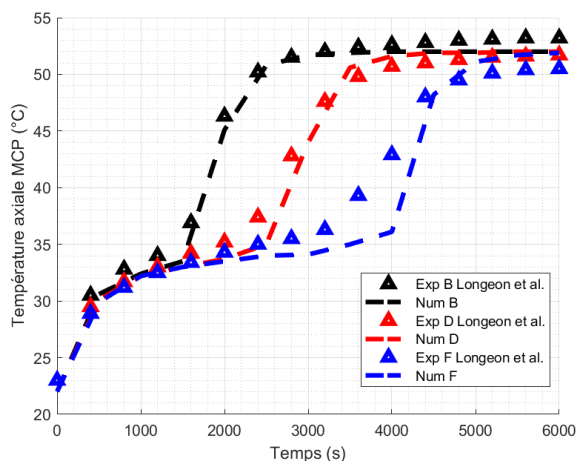


Figure 5 : Evolution de la température locale du MCP

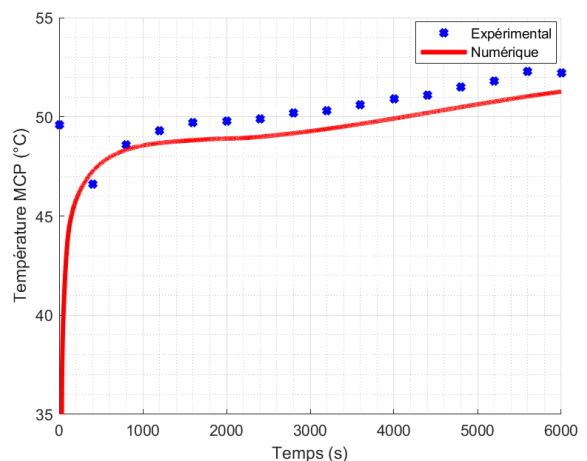


Figure 6 : Evolution de la température de sortie du HTF

### 3.2. Application de la méthodologie numérique à l'analyse de l'impact des ailettes et leur redistribution sur le processus de fusion d'un MCP

Dans cette section, la procédure numérique présentée et qualifiée ci-dessus est appliquée à l'analyse de l'impact des ailettes et leur redistribution sur le processus de fusion d'un MCP. La figure 7 présente l'évolution de la fraction liquide du MCP dans les 5 configurations. On remarque dans un premier temps que toutes les configurations ailetées présentent à chaque instant une fraction liquide supérieure à la configuration de référence. Cela résulte sans surprise de l'augmentation de la surface d'échange par les ailettes, qui améliore d'une part la conductivité globale du MCP, et d'autre part l'échange thermique entre le tube chauffé et le MCP. En effet, l'augmentation de la surface d'échange du simple au double permet d'augmenter de plus de 2 fois le transfert thermique. A 600 s, le flux échangé est de 14 W pour REF contre 33 W pour R4. En comparant les 4 géométries intensifiées à iso-surface d'échange, on constate que les configurations à 8 ailettes ont une fusion accélérée dans un premier temps par rapport aux configurations à 4 ailettes. Cela s'explique par une fusion rapide et plus globale de la partie du MCP à proximité du tube du fait du nombre des ailettes et donc une convection naturelle

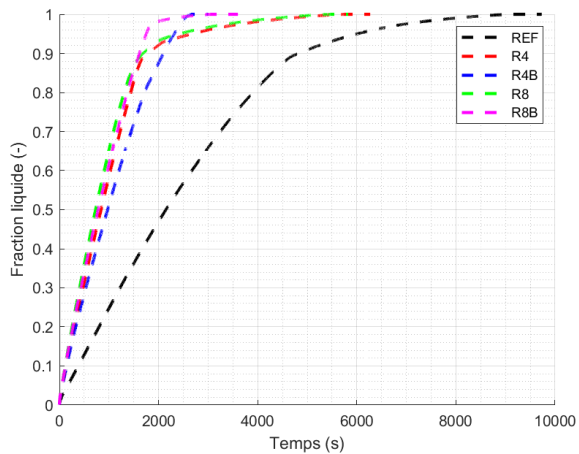


Figure 7 : Evolution de la fraction liquide du MCP

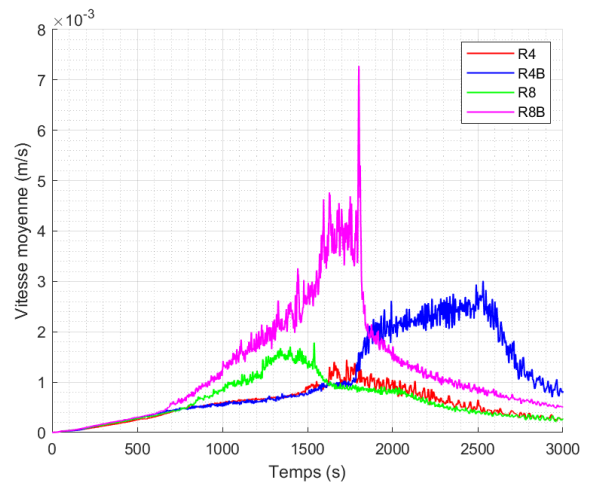


Figure 8 : Evolution de la vitesse du MCP fondu

qui se développe très rapidement et intensément. A l'inverse, les ailettes longues entraînent une fusion plus locale du MCP dans le voisinage proche et lointain du tube, ne favorisant pas un développement accéléré de la convection naturelle. De plus, la longueur des ailettes compartimentant presque l'échangeur, freine la convection naturelle par un confinement du MCP. Ces analyses peuvent être observées sur la figure 8 qui montre l'évolution de la vitesse moyenne du MCP fondu dans la calandre, et traduit l'intensité de la convection naturelle, responsable des écarts observés à iso-surface. L'évolution fluctuante des vitesses a été aussi observé dans les travaux de Kumar et al. [9] et s'explique par la variation linéaire des propriétés thermophysiques dans la "mushy zone". Pour une fusion allant jusqu'à 90 %, les configurations R8 et R8B sont les plus efficaces en réduisant le temps de fusion d'environ 65 % par rapport à REF. En analy-

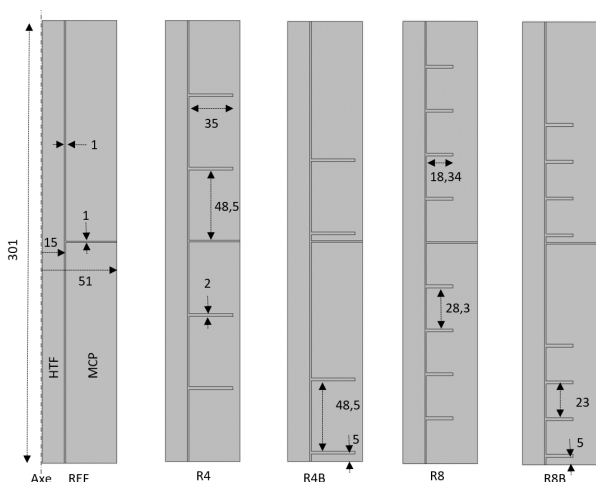


Figure 9 : Géométrie d'étude de la répartition des ailettes

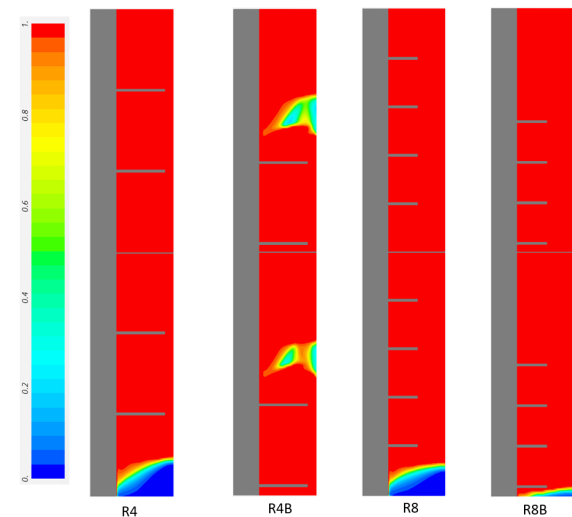


Figure 10 : Cartographie de fraction liquide à 2400 s

sant les cartographies de la fraction liquide présentées sur la figure 10 et la figure 7, on remarque que la durée de passage de 90 % à 100 % est parfois la plus élevée. Cela est dû à une partie du MCP située dans la partie inférieure de l'échangeur, pas assez impactée par la convection naturelle, et n'est pas en contact des ailettes. Cette partie du MCP est soumise principalement à la conduction thermique dans le MCP qui rappelons le a une conductivité thermique faible. Il s'en suit alors que cette partie du MCP fond plus lentement et rallonge considérablement le temps de fusion complète. En concentrant une partie des ailettes dans la région inférieure de l'échangeur, cela permet d'accélérer la fusion complète du MCP, ce qui est remarqué dans les cas des confi-

gurations R4B et R8B qui permettent de réduire le temps de fusion complète respectivement de 69 % et 64 %. Les configurations de R4 et R8 permettent de réduire le temps de fusion complète de respectivement 35 % et 38 %. Une application de ces résultats au développement d'un système de stockage latent permettra une réduction importante des durées des cycles.

## 4. Conclusion

L'objectif principal de notre étude est de valider une procédure numérique de fusion d'un MCP et d'étudier l'influence de la redistribution des extensions de surface dans un échangeur-stockeur tube calandre vertical sur les cinétiques de fusion d'un MCP en présence de phénomènes de convection naturelle. Les principaux résultats sont :

- La procédure numérique mise en œuvre dans le code de calcul STARCCM+ permet de modéliser assez précisément le processus de changement de phase des MCPs.
- L'augmentation de la surface d'échange par extension de surface permet de réduire de façon considérable le temps de fusion du MCP.
- Pour une surface d'échange constante, l'utilisation d'ailettes courtes en grand nombre est plus efficace, et en concentrant les ailettes dans la partie basse de l'échangeur le temps de fusion complète du MCP peut être réduit d'environ 69 %.

A la suite de cette étude, un banc d'essai sera développé afin de caractériser un échangeur-stockeur intensifié côté calandre en cours de développement dans le cadre d'un projet de thèse. Cette installation expérimentale permettra de quantifier les échanges avec l'environnement qui seront pris en compte dans l'étude numérique et comprendra une caractérisation fine des propriétés thermophysiques des MCPs étudiés.

## Références

- [1] A. K. Hassan, J. Abdulateef, M. S. Mahdi, and A. F. Hasan, Experimental evaluation of thermal performance of two different finned latent heat storage systems, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, 10 2020
- [2] M.A. Dekhil, J.V. Simo Tala, O. Bulliard-Sauret, D. Bougeard, Numerical analysis of the effect of the iso-surface fin redistribution on the performance enhancement of a shell and-tube latent heat thermal energy storage unit for low-temperature applications, *Journal of Energy Storage*, Volume 56, Part A, 2022.
- [3] V. R. Voller et C. R. Swaminathan, General source-based method for solidification phase change, *Numerical Heat Transfer, Part B : Fundamentals* 19 175-89 1991.
- [4] CD-Adapco. Star CCM+ v15.04 user guide. User guide, 2020.
- [5] N. Hannoun, V. Alexiades, T.Z. Mai, A reference solution for phase change with convection, *International journal for numerical methods in fluids*, Volume 48, 2005, Pages 1283-1308.
- [6] M. Longeon, A. Soupart, J. F. Fourmigué, A. Bruch et P. Marty, Experimental and numerical study of annular PCM storage in the presence of natural convection, *Applied Energy*, 112 175-84 2013.
- [7] B. Yang, A. Raza, F. Bai, T. Zhang, Z. Wang, Microstructural evolution within mushy zone during paraffin's melting and solidification, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 141 (2019), pp. 769-778.
- [8] L. Pu, S. Zhang, L. Xu, Y. Li, Thermal performance optimization and evaluation of a radial finned shell and-tube latent heat thermal energy storage unit , *Applied Thermal Engineering*, 166 (2020)
- [9] J. Kumar, P. Singh, R. Kumar, Enhancement of the part-load thermal charging performance of a latent heat thermal energy storage unit with variable length fins at effective locations, *Renewable Energy Focus.*, 43 (2022), pp. 130-145.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier de l'ADEME, l'Institut Mines Télécom Nord Europe (IMT Nord Europe) et la région Haut-de-France à qui nous adressons nos sincères remerciements.