

Évaluation de l'intensification du transfert de chaleur dans une unité de stockage thermique latent par l'utilisation d'une géométrie d'échange de type multitube et calandre aileté

Soumaya SOKAKINI^{*}, Jules Voguelin SIMO TALA¹, Lionel NADAU², Adrian ILINCA³, Daniel BOUGEARD¹

¹IMT Nord Europe, Institut Mines - Télécom, Univ. Lille, CERI Energie et Environnement
F-59000, Lille, France

² ENGIE Lab CRIGEN

4 rue Joséphine Baker, 93240 Stains, France

³Département de Génie mécanique, École de technologie supérieure, Université du Québec
1100 Notre-Dame St W, Montréal, QC H3C 1K3, Canada

^{*}(auteur correspondant : soumaya.sokakini@imt-nord-europe.fr)

Résumé : Le stockage latent émerge comme une solution prometteuse pour récupérer et valoriser la chaleur fatale. Afin d'optimiser le transfert de chaleur dans l'unité de stockage, une nouvelle configuration multitube aileté est présentée et comparée à un cas de référence utilisant des tubes nus, à volume constant du MCP. Cette étude numérique en 3D, réalisée à l'aide du logiciel CFD Star CCM+, démontre une diminution de 27,4 % du temps de fusion et de 31,5 % du temps de solidification avec l'utilisation du système multitube aileté par rapport au multitube sans ailettes. De plus, les effets tridimensionnels associés au gradient de température axial dans le fluide caloporteur ont été identifiés comme ayant une influence significative sur les processus de fusion et de solidification.

Nomenclature

C_p Chaleur spécifique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

L Chaleur latente, $J.kg^{-1}$

T Température, K

\vec{V} Vecteur vitesse, $m.s^{-1}$

g Accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$

t Temps, s

P Pression, Pa

f_l Fraction liquide, -

H Energie totale par unité de masse, $J.kg^{-1}$

h Energie sensible par unité de masse, $J.kg^{-1}$

ΔH Energie latente par unité de masse, $J.kg^{-1}$

Symboles grecs

ρ Masse volumique, $kg.m^{-3}$

β Coefficient d'expansion thermique, K^{-1}

μ Viscosité dynamique, $kg.m^{-1}.s^{-1}$

λ Conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

Indices et exposants

S Solidus

L Liquidus

ref référence

Abréviations

MCP Matériau à changement de phase

FC Fluide caloporteur

CFD Computational Fluid Dynamics

1. Introduction

La chaleur fatale industrielle basse et moyenne température (100 à 400 °C) représente un potentiel considérable d'énergie thermique sous-exploitée en France. L'utilisation de Matériaux à Changement de Phase (MCP) pour le stockage thermique latent émerge comme une solution prometteuse pour récupérer et valoriser cette chaleur. Cependant, un défi majeur persiste, lié à la faible conductivité thermique des MCP, entraînant un ralentissement des processus de charge et de décharge. Parmi les diverses techniques visant à résoudre ce problème, l'intensification du transfert de chaleur par extension de surface, par l'ajout des ailettes ou l'utilisation des multitubes, se présente comme une solution prometteuse. Agyenim [1] a comparé expérimentalement l'intensification des transferts thermiques par l'utilisation d'ailettes

annulaires, longitudinales et d'un système multitube. Il a été conclu que le système multitube est le plus performant durant la charge et que le système à ailettes longitudinales est le plus efficace pour la décharge. À la suite de cette étude, il a été recommandé d'effectuer des investigations sur l'intensification des échanges thermiques en combinant les deux techniques d'intensification pour améliorer à la fois la charge et la décharge. Dans ce sens, Khan et al. [2] ont étudié expérimentalement la décharge dans un système de 21 tubes ailetés et ont trouvé que l'inclusion des ailettes longitudinales permet d'améliorer le processus de solidification. Anish et al. [3] ont analysé l'effet de plusieurs paramètres de conception des tubes et des ailettes sur le processus de fusion. Ils ont constaté que le nombre de tubes, la hauteur des ailettes et la rotation des tubes et des ailettes ont une influence significative sur la fusion. Huang et al. [4] ont proposé une nouvelle forme d'échangeur multitube aileté dotée d'ailettes arborescentes et ont trouvé que cette forme d'ailette réduit le temps de fusion et solidification jusqu'à 29,4 % et 22,8 % respectivement par rapport aux ailettes longitudinales classiques. L'analyse de la littérature scientifique montre que peu d'études se sont consacrées à l'intensification des échanges thermiques par combinaison de l'extension de surface et de l'utilisation de multitubes. Elle montre également, que les études publiées sur les différentes techniques d'intensification sont souvent réalisées de façon simplifiée en 2D [5] négligeant le gradient de température axial.

Cette étude numérique tridimensionnelle présente une nouvelle unité de stockage latent multitube à ailettes conçue pour l'exploitation de la chaleur résiduelle industrielle à basse et moyenne température. Les performances de cette unité sont examinées en comparaison avec une configuration multitube sans ailette, spécifiquement pour les phases de fusion et de solidification. Une contribution significative de cette étude réside dans l'analyse des effets tridimensionnels sur les processus de fusion et de solidification, offrant ainsi une compréhension approfondie des performances de l'unité dans des conditions réelles.

2. Méthodologie

2.1. Modèle physique

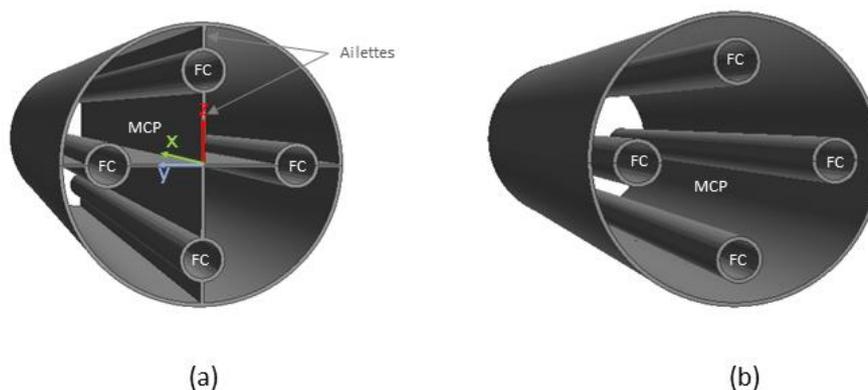


Figure 1 : Schéma des configurations étudiées : (a) multitube aileté et (b) multitube.

La figure 1 illustre les deux unités de stockage comparées dans le cadre de cette étude. La première unité, dénommée multitube aileté, consiste en un échangeur de chaleur horizontal de type tube et calandre dans lequel le MCP (Erythriol) est contenu dans une calandre de 70 cm de long, d'un diamètre interne de 14,6 cm et d'une épaisseur de 2 mm, tandis que le fluide caloporteur (Hytherm 600) circule dans quatre tubes équidistants, d'un diamètre interne de 20 mm et d'une épaisseur de 2 mm, placés à 5 cm du centre de l'échangeur de chaleur et formant un angle de 90° l'un par rapport à l'autre. Afin d'intensifier le transfert de chaleur, des ailettes

longitudinales de 2 mm d'épaisseur reliant les quatre tubes ainsi que la calandre sont ajoutées. L'aluminium est utilisé pour les ailettes, les tubes et la calandre. La seconde unité de stockage (multitube) qui sert de référence est constituée de 4 tubes nus (sans ailettes). Pour cette configuration seul le diamètre de la calandre est modifié de telle sorte que les deux configurations soient comparées à iso-volume de MCP. Les propriétés thermo-physiques du MCP sont listées dans le tableau 1 et ceux du fluide caloporteur et d'aluminium sont disponibles dans [6], [7]. En raison de la symétrie des deux configurations et des phénomènes physiques, seule la moitié des géométries (par rapport au plan traversant l'ailette verticale) est simulée, ce qui permet de réduire le temps de calcul et le coût numérique.

ρ	μ	λ	C_p	L	T_s/T_L	β
kg.m^{-3}	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	J.kg^{-1}	$^{\circ}\text{C}$	K^{-1}
1480 à 20 $^{\circ}\text{C}$	0,01	linéaire 0,733 à 20 $^{\circ}\text{C}$ 0,326 à 140 $^{\circ}\text{C}$	solide : 1380 liquide : 2760 linéaire entre T_s et T_L	339,8	116,7/118,7	0,001014

Tableau 1 : Propriétés thermo-physiques du MCP (erythritol) [6].

2.2 Formulation physique

Le problème est simulé en 3D par l'utilisation du Code CFD Star CCM+ où le changement de phase est modélisé par la méthode enthalpie porosité [8].

Les hypothèses suivantes sont considérées afin de simplifier l'étude :

- Les écoulements du fluide caloporteur et du MCP liquide sont incompressibles et laminaires.
- L'expansion volumique et la dissipation visqueuse sont négligées.
- L'approximation de Boussinesq est considérée pour tenir compte de la convection naturelle.

Compte tenu des hypothèses ci-dessus, les équations gouvernant l'écoulement et les échanges convectifs dans le MCP se présentent comme suit :

Equation de conservation de masse :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

Equation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{S}_B + A \vec{V} \quad (2)$$

$$\vec{S}_B = \rho \vec{g} \beta (T_{ref} - T) \quad (3)$$

\vec{S}_B représente le terme source de flottabilité et $A \vec{V}$ est ajouté à l'équation pour modéliser toute les phases du MCP, à savoir la phase liquide, solide et la « mushy zone ». Ce terme est basé sur la relation de Carman-Konzy donnée par l'équation (4) ci-dessous:

$$A = -C \frac{(1 - f_l)}{f_l^3 + \epsilon} \quad (4)$$

Dans l'équation (4), C est la constante de la mushy zone, ϵ est une petite constante numérique de valeur 0.001 pour éviter la division par 0 et F_l est la fraction liquide définie comme :

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

Equation de l'énergie :

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla(\vec{V} \cdot h) = \nabla \left(\frac{\lambda}{\rho C_p} \nabla h \right) \quad (6)$$

Où H est énergie totale, calculée comme la somme de l'enthalpie latente et sensible :

$$H = h + \Delta H \quad (7)$$

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (8)$$

$$\Delta H = f_l \cdot L \quad (9)$$

2.3. Conditions aux limites et initiales

- Processus de fusion :

Initialement, l'ensemble du système est à une température de 80 °C. Ensuite, à l'entrée des tubes, un profil de Poiseuille correspondant à un nombre de Reynolds de 2000 est imposé, avec une température de 155 °C. A la sortie des tubes, une condition de pression de sortie atmosphérique est appliquée. Au niveau des interfaces solide-solide et liquide-solide, le transfert conducto-convectif est adopté. De plus, la paroi extérieure de l'échangeur est considérée adiabatique et une condition de symétrie est également utilisée sur le plan de symétrie permettant la réduction du domaine.

- Processus de solidification :

Pendant la solidification, le système est initialement considéré à une température de 155 °C. Les conditions aux limites restent les mêmes que pour la fusion, à l'exception de la température d'entrée qui est ramenée à 80 °C.

2.4. Validation du code de calcul

Afin d'évaluer la précision de notre code de calcul Star CCM+ dans la modélisation des problèmes de changement de phase incluant la convection naturelle, une étude de validation a été réalisée et les résultats obtenus ont été comparés avec le benchmark de Hannoun et al [9].

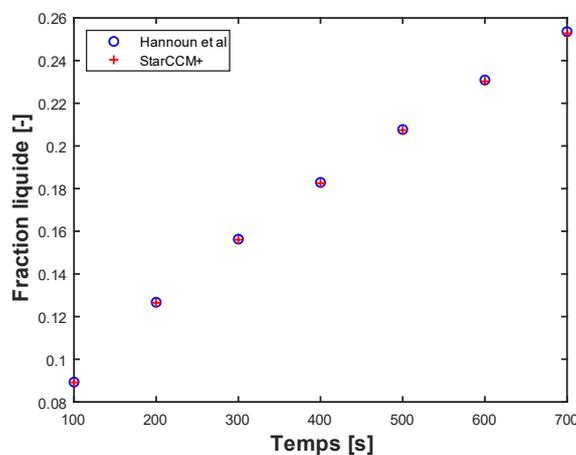


Figure 2 : Comparaison de la fraction liquide entre le benchmark et le code Star CCM+

Le problème étudié porte sur la fusion de l'étain pur dans une cavité carrée de $0,1 \times 0,1\text{m}$ différentiellement chauffée. Les résultats de comparaison de la fraction liquide obtenue avec le code de calcul Star CCM+ montrent une bonne concordance avec le benchmark (figure 2), avec une différence maximale de 0,31 %.

3. Résultats et discussion

3.1. Processus de fusion

Cette partie est consacrée à la comparaison entre la configuration multitube aileté et celle de référence (multitube) durant la fusion. Afin de comprendre les mécanismes locaux durant cette phase, les cartographies de la fraction liquide dans un plan transversal au centre de l'unité de stockage ($x=35\text{ cm}$) pour les deux configurations sont présentés dans la figure 3. Au début du processus de fusion, une fine couche de MCP liquide se forme autour des tubes et des ailettes (pour le multitube aileté), caractérisée par un front de fusion symétrique indiquant que le transfert de chaleur se fait principalement par conduction. Au fil du temps, le volume du MCP fondu augmente et le front de fusion devient asymétrique témoignant de la présence de la convection naturelle qui, avec le temps, devient prédominante dans le transfert de chaleur par rapport à la conduction. Il peut être également observé que le MCP situé dans la partie supérieure fond plus rapidement. Cela est dû aux effets de flottabilité qui, du fait de la différence de densité, déplace le MCP liquide et chaud vers le haut et le MCP solide et froid vers le bas.

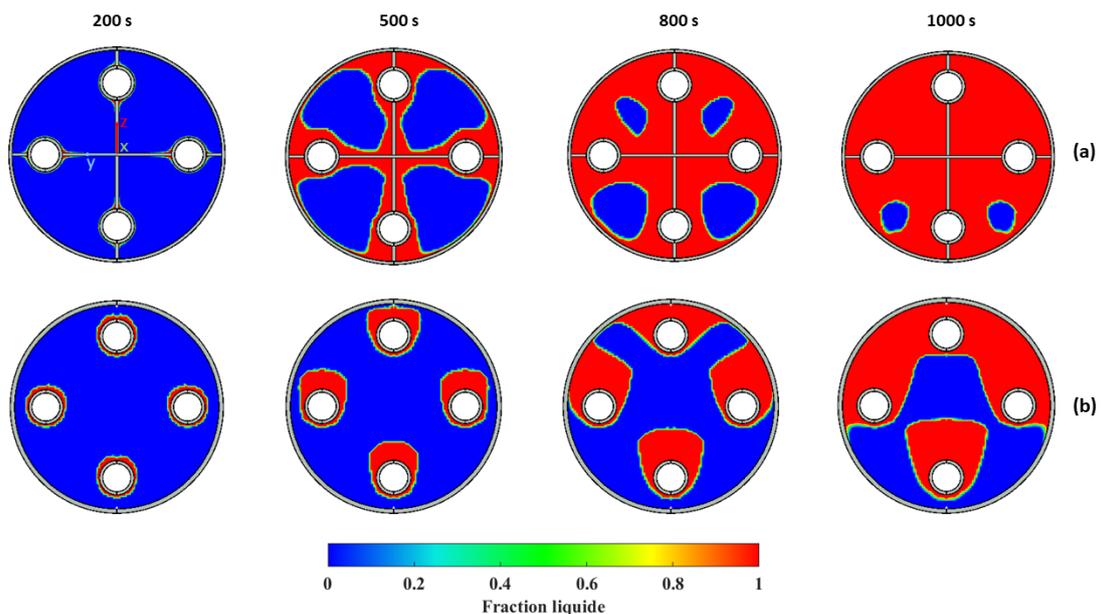


Figure 3 : Contours de la fraction liquide durant la fusion pour les configurations : multitube aileté (a) et multitube (b).

En comparant les deux configurations, on voit clairement que la configuration multitube aileté fond plus rapidement et que l'extension de la surface d'échange (aillette) jusqu'au centre de l'unité de stockage dans cette configuration accélère le transfert dans cette zone, qui dans le cas du multitube nu, prend beaucoup de temps à fondre.

La figure 4 montre l'évolution de la fraction liquide dans toute l'unité de stockage pour les deux configurations. La configuration multitube aileté permet d'effectuer une fusion

complète après 18,8 min contre 26 min pour la configuration multitube. L'extension de surface d'échange par l'ajout des ailettes permet donc une réduction de 27,4 % du temps de fusion.

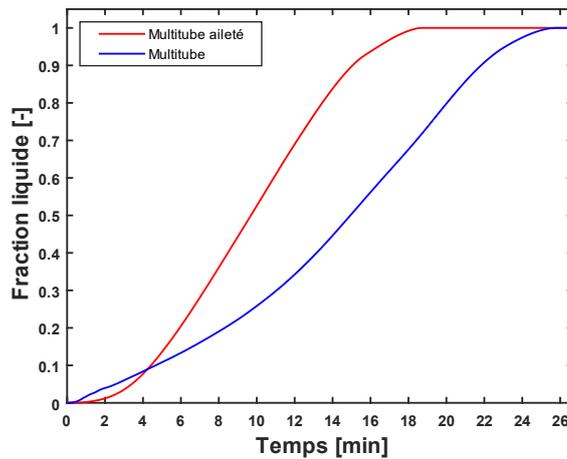


Figure 4 : Evolution temporelle de la fraction liquide pendant la fusion - configuration avec et sans ailettes.

3.2. Processus de solidification

Les cartographies de fraction liquide au cours de la solidification présentées dans la figure 5 montrent une asymétrie au début de la solidification, signifiant que le transfert de chaleur se fait d'abord par convection naturelle, avant que la conduction ne prédomine lorsque la fraction liquide diminue dans l'unité de stockage. On voit également que la partie inférieure du MCP se solidifie plus rapidement, en raison de la présence de la convection naturelle.

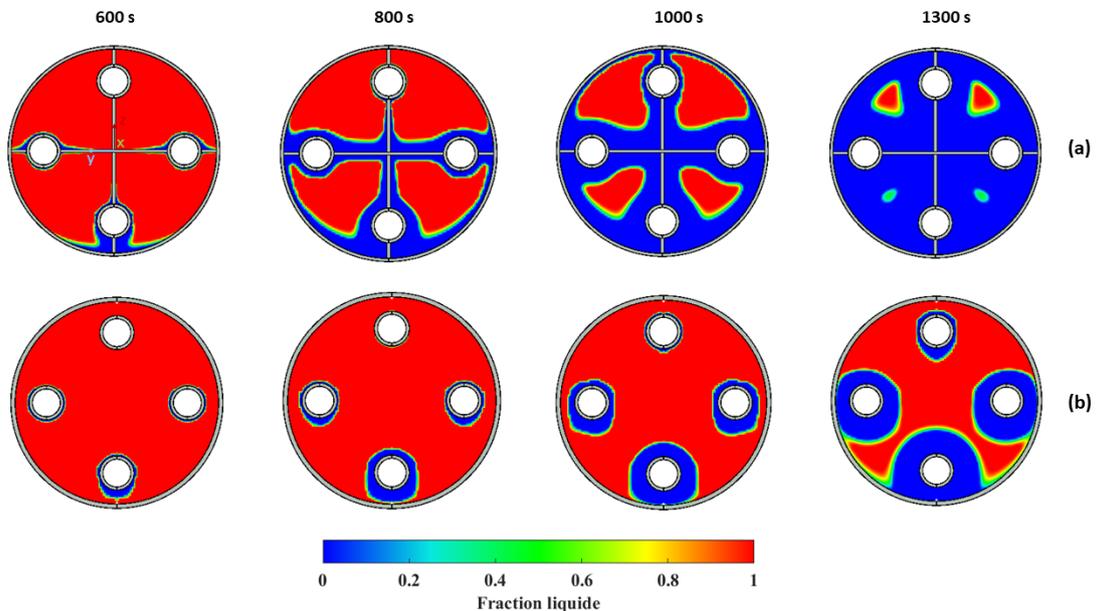


Figure 5 : Contours de la fraction liquide durant la solidification pour les configurations : multitube aileté (a) et multitube (b).

Comme le montrent la figure 5 et la figure 6, qui présente la fraction solide en fonction du temps dans l'ensemble de l'unité de stockage, la solidification du MCP est beaucoup plus

rapide dans la configuration multitube aileté, avec un temps de solidification de 25,5 min contre 37,8 min pour le multitube. Cela représente une réduction de 31,5 % du temps de solidification.

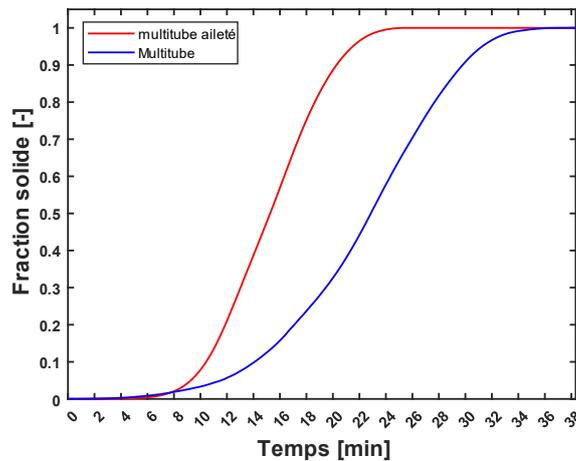


Figure 6 : Evolution temporelle de la fraction solide pendant la solidification - configuration avec et sans ailettes

3.3. Effet tridimensionnel sur la cinétique de fusion et la solidification

Cette section se penche sur l'influence de la tridimensionnalité sur la cinétique de fusion et de solidification, visant à évaluer la pertinence de l'adoption d'une approche tridimensionnelle par rapport à une approche bidimensionnelle. À cet effet, l'évolution temporelle de la fraction liquide moyenne pendant la fusion est tracée à deux positions par rapport à l'entrée du fluide caloporteur, à $x=10$ cm et $x=60$ cm (figure 7), pour la configuration multitube aileté. De manière similaire, la fraction solide est tracée pendant le processus de solidification (figure 8).

Concernant la fusion, une différence notable est observée dans l'évolution de la fraction liquide entre les deux positions. Comme prévu, le MCP près de l'entrée du fluide fond plus rapidement, attribuable à l'existence d'un gradient de température axial significatif dans le fluide caloporteur. Dans la section transversale à $x=10$ cm, la fusion du MCP est complète en 16 minutes, tandis qu'à la position 60 cm, elle se prolonge jusqu'à 18,5 minutes, représentant une différence notable de 15 %. L'évolution temporelle de la fraction solide pendant la solidification (figure 8) révèle également une disparité entre les deux positions, d'environ 8 %, avec une solidification complète après 23,6 minutes à la position 10 cm, comparée à 25,46 minutes à la position 60 cm.

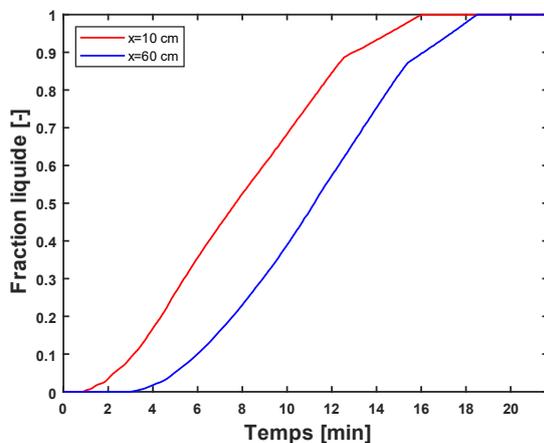


Figure 7 : Evolution de la fraction liquide moyenne durant la fusion à deux positions.

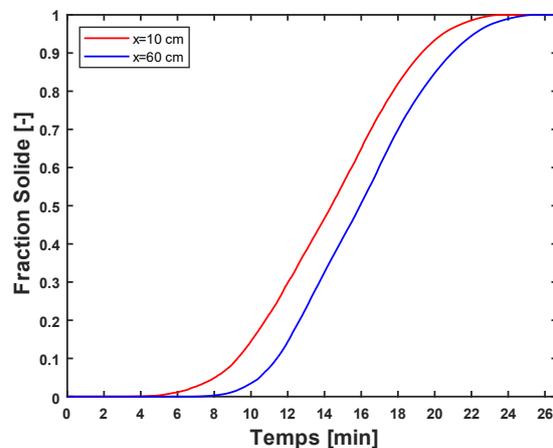


Figure 8 : Evolution de la fraction solide moyenne durant la solidification à deux positions.

4. Conclusion

Dans cette étude numérique tridimensionnelle, une unité de stockage thermique latent, sous forme d'un échangeur multitube et calandre aileté a été évaluée et comparée à iso-volume du MCP à un cas de référence sans ailettes. Les résultats ont démontré que l'ajout d'ailettes à l'échangeur multitube entraîne une réduction significative de 27,4 % du temps de fusion et de 31,5 % du temps de solidification. Les effets tridimensionnels, en particulier liés au gradient de température axial dans les tubes, ont été identifiés comme ayant une influence majeure, pouvant induire une différence axiale de fusion ou de solidification atteignant 15 %. Ainsi, il est fortement recommandé de prendre en compte la troisième dimension pour une simulation plus précise des phénomènes de changement de phase, en particulier pour les échangeurs de chaleur de grande longueur.

Suite à ce travail, une étude paramétrique sur les dimensions des tubes caloporteurs, leur nombre et leurs positions, ainsi que sur l'épaisseur des ailettes et la forme de l'échangeur sera effectuée. Cette approche permettra d'identifier les paramètres majeurs qui impacte les performances en termes de transfert thermique et de cinétique de charge-décharge, ouvrant ainsi la voie à une optimisation multi-objectif de l'unité de stockage.

Références

- [1] F. Agyenim, The use of enhanced heat transfer phase change materials (PCM) to improve the coefficient of performance (COP) of solar powered LiBr/H₂O absorption cooling systems, *Renewable Energy*, (2016), 229-239.
- [2] Z. Khan et Z. A. Khan, An experimental investigation of discharge/solidification cycle of paraffin in novel shell and tube with longitudinal fins based latent heat storage system, *Energy Conversion and Management*, (2017), 157-167.
- [3] R. Anish., M. M. Joybari, S. Seddegh, V. Mariappan, F. Haghghat, et Y. Yuan, Sensitivity analysis of design parameters for erythritol melting in a horizontal shell and multi-finned tube system: Numerical investigation, *Renewable Energy*, (2021), 423-436.
- [4] Y. Huang, L. Song, S. Wu, et X. Liu, Investigation on the thermal performance of a multi-tube finned latent heat thermal storage pool, *Applied Thermal Engineering*, (2022), 117658.
- [5] S. Zhang, S. Mancin, et L. Pu, A review and prospective of fin design to improve heat transfer performance of latent thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*, (2023) 106825.
- [6] A. J. Parry, P. C. Eames, et F. B. Agyenim, Modeling of Thermal Energy Storage Shell-and-Tube Heat Exchanger, *Heat Transfer Engineering*, (2014), 1-14.
- [7] A. K. Raul, P. Bhavsar, et S. K. Saha, Experimental study on discharging performance of vertical multitube shell and tube latent heat thermal energy storage, *Journal of Energy Storage*, (2018), 279-288.
- [8] V. R. Voller, M. Cross, et N. C. Markatos, An enthalpy method for convection/diffusion phase change », *Numerical Meth Engineering*, (1987), 271-284.
- [9] N. Hannoun, V. Alexiades, et T. Z. Mai, A reference solution for phase change with convection, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, (2005), 1283-1308.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leur gratitude à l'IMTNE, ENGIE, ETS Montréal et à la région HDF.