

Analyse expérimentale du processus de solidification de l'eau pure autour du point d'inversion de sa masse volumique dans un échangeur tube-calandre : application au stockage latent de froid

Jules Voguelin SIMO TALA^{1,*}, Khaoula CHAFIKI¹, Daniel BOUGEARD¹

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

* (auteur correspondant : jules-voguelin.simo.tala@imt-nord-europe.fr)

Résumé - La présente étude s'intéresse à l'analyse expérimentale du processus de solidification d'un MCP pour des applications de stockage d'énergie thermique à basse température. Le MCP considéré est de l'eau pure contenue dans la calandre d'un échangeur de type tube-calandre en configuration horizontale, pour laquelle la température initiale du MCP est choisie autour et au loin du point d'inversion de sa dépendance masse volumique-température. Cette étude montre que la forme du front de solidification de l'eau pure est fortement affectée par sa température initiale selon que celle-ci est supérieure ou inférieure au point d'inversion de la masse volumique du MCP, induisant soit une asymétrie, soit une allure symétrique de la matière solidifiée autour du tube frigoporteur. Les mesures de température ont permis de mettre en évidence l'inversion des forces de flottabilité sur le processus de solidification du MCP conduisant à la définition de deux régimes thermiques distincts caractérisant la solidification dans cette configuration d'échange.

Nomenclature

d	Diamètre du tube central, m	x	Position axiale, m
e	Espace annulaire, m	T	Température, K
g	Accélération de la pesanteur, ms^{-2}	t	Temps, s
h	Hauteur intérieur, m	U	Vitesse débitante, ms^{-1}
l	Largeur intérieur, m	<i>Symboles grecs</i>	
L	Longueur, m	ρ	Masse volumique, kgm^{-3}
r	Position par rapport à l'axe du tube, m	μ	Viscosité dynamique, $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$
R	Rayon du tube extérieur,	<i>Indices et exposants</i>	
Re_d	Nombre de Reynolds, $\frac{\rho U d}{\mu}$, -	i/n	numéro/nombre du/des thermocouple(s)

1. Introduction

Le stockage d'énergie thermique suscite l'intérêt de nombreuses recherches depuis des décennies et plus particulièrement ces dernières années compte tenu des enjeux de la transition énergétique et écologique. Afin d'assurer un fonctionnement continu des procédés et systèmes dépendant de sources intermittentes d'énergie thermique, il est d'une importance capitale de stocker cette énergie dans le but de différer son utilisation. C'est le cas notamment des applications dans le solaire thermique, l'habitat, le management thermique de composants dans l'industrie, etc. [1]. Le stockage thermique peut se faire sous forme sensible, latente ou thermochimique. Le stockage thermique latent se fait en utilisant des matériaux à changement de phase MCP. Il a un avantage compétitif par rapport aux deux autres formes de stockage à savoir : une densité énergétique élevée pour une utilisation à température relativement constante [3]. Les matériaux à changement de phase existent dans une large gamme de

température de changement d'état, le plus abondant étant l'eau naturelle dont la transition de phase se fait à 0°C dans le cas de l'eau pure sans surfusion. A basse température, le stockage d'énergie thermique peut être utile pour des applications telles que la climatisation, le conditionnement thermique de produits alimentaires ou la conservation de médicaments [1-3]. Dans ces applications, l'eau est le MCP de choix pour le stockage d'énergie cependant, contrairement à la plupart des MCP, sa transition de la phase liquide à la phase solide est accompagnée d'un accroissement de volume. La littérature est très fournie pour ce qui concerne l'analyse numérique et expérimentale des processus de fusion-solidification de MCP ne présentant pas un point d'inversion de l'évolution de la masse volumique vis-à-vis de la température [4-6]. Les forces de flottabilités qui jouent un rôle crucial sur le développement de la convection naturelle pour ces MCP sont gouvernées par des valeurs positives du coefficient d'expansion isobare. Dans le cas des MCP présentant un point d'inversion de la dépendance masse volumique-température, les phénomènes convectifs naturels qui jouent un rôle majeur sur les cinétiques de fusion-solidification ont des évolutions contraires autour du point d'inversion. Des études numériques récentes se sont intéressées à l'analyse des échanges convectifs lors du processus de solidification de l'eau partant du point d'inversion de la dépendance masse volumique-température. C'est le cas des travaux numériques récents de Dekhil et al [2-3] qui analysent l'influence de l'intensification des échanges thermiques côté calandre d'un échangeur-stockeur sur les cinétiques de fusion-solidification de l'eau pure et mettent en évidence la meilleure performance des ailettes longitudinales sur les ailettes radiales dans la configuration d'échangeur-stockeur tube-calandre horizontale. Quelques travaux [7-8] se sont intéressés à la solidification de l'eau dans d'autres configurations géométriques d'échange mais à notre connaissance, très peu d'études se sont intéressées à l'analyse expérimentale du comportement de l'eau lors de sa solidification partant de différentes valeurs initiales de température autour et au loin du point d'inversion de sa masse volumique pour des applications de stockage de froid.

La présente étude expérimentale s'intéresse à l'analyse du processus de solidification de l'eau pure confinée dans un échangeur-stockeur de type tube et calandre en employant une technique de visualisation qualitative de front de solidification couplée à des mesures quantitatives de thermométrie locale. Une étude de l'influence de la température initiale de l'eau autour et au loin du point d'inversion de la dépendance masse volumique-température est effectuée dans le but de caractériser par des mesures de distribution locale de température l'influence du développement de la convection naturelle sur la forme et l'évolution temporelle du front de solidification.

2. Dispositif expérimental, acquisition et traitement de données

2.1. Présentation du dispositif expérimental

La figure 1 présente le schéma de principe de l'installation expérimentale. Il s'agit d'un banc d'essai composé de deux circuits fluides séparés dont un pour l'initialisation de la température du MCP (eau) et l'autre pour la circulation du fluide frigoporteur (eau glycolée à 40% de glycol). Cette installation est composée de différents éléments : un échangeur de chaleur bitube à circulation « aller » dans le tube central et « retour » dans l'espace annulaire formé par les deux tubes. Il sert à véhiculer le fluide frigoporteur et assure l'échange thermique entre ce dernier et le MCP ; un bain thermostaté FP51SL de marque JULABO qui permet de réguler la température d'entrée de l'eau glycolée à la valeur de température souhaitée ; un second bain thermostaté permettant d'initialiser la température du MCP à une valeur souhaitée ; un débitmètre électromagnétique haute précision (Process Master FEP300 de marque ABB) qui permet de mesurer le débit quittant le bain thermostaté contenant le fluide frigoporteur ; une

pompe équipée d'une vanne by-pass pour la circulation du fluide frigoporteur ; deux électrovannes dont une en position ouverte lors de la solidification de l'eau (électrovanne 1) pendant que l'autre, reliée au circuit primaire BP (figure 1) est en position fermée (électrovanne 2) ; une centrale d'acquisition servant à relever les valeurs de température et de débit mesurés respectivement par les thermocouples et le débitmètre, reliée à un PC ; une section d'essai en plexiglas (PMMA) instrumentée ; deux sondes de température (PT100) pour la mesure de la température en entrée et en sortie de l'échangeur ; un thermomètre de référence haute précision PT100 servant à calibrer les thermocouples ; une boîte isolée en polystyrène contenant une sonde PT100 permettant la mesure de température au niveau des soudures froides déportées dans la boîte afin d'effectuer une compensation de soudure froide des thermocouples. Toutes les canalisations qui véhiculent le fluide frigoporteur et le MCP ont été isolées afin de limiter les déperditions thermiques.

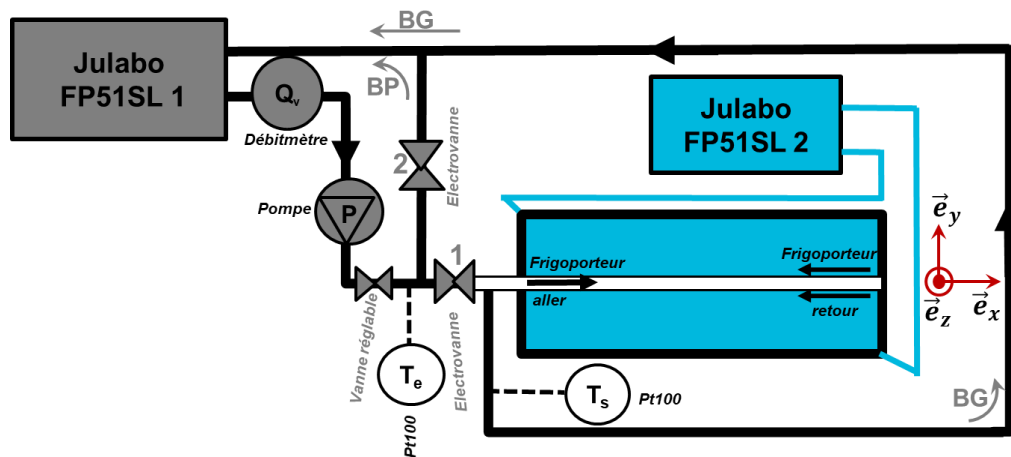


Figure 1 : Schéma de principe de l'installation expérimentale

Des essais de thermométrie locale et de visualisation de front de fusion devant être effectués, une vue isométrique de la section d'essai (sans sa face supérieure) est présentée sur la figure 2a. Il s'agit d'une boîte parallélépipédique en plexiglas à parois épaisses conçue et instrumentée par 27 thermocouples sur trois faces tout en laissant deux de ses faces non instrumentées afin de réaliser des visualisations de front de solidification.

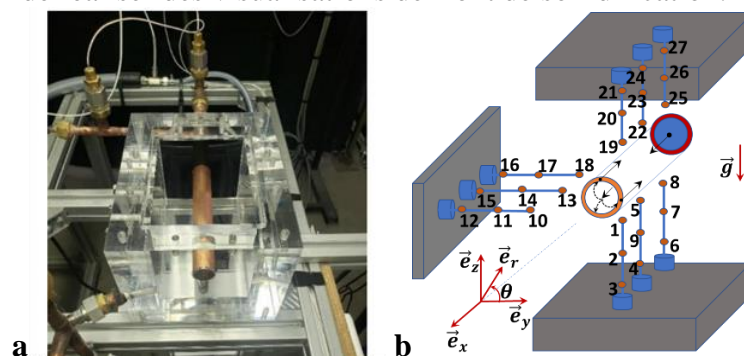


Figure 2 : Vue de la section d'essai (a) positions des thermocouples dans le MCP (b)

Les thermocouples sont installés à travers 9 passages étanches accueillant chacun trois thermocouples de types T de diamètre 0,5 mm. Chaque thermocouple est muni d'une gaine en acier inoxydable à son extrémité (d'environ 15 cm) qui permet d'atténuer les potentielles fuites thermiques liées à la grande conductivité thermique du cuivre dont ils sont constitués (possible effet d'ailettes). Une bride a été prévue à l'entrée de la section d'essais afin d'installer aussi bien un échangeur à tube nu et ultérieurement à tube aileté. Afin d'améliorer le contraste lors de la visualisation du front de solidification, une plaque ABS de couleur noire a été découpée

et enfilée sur l'échangeur bitube pour servir de fond d'image. La section d'essai est traversée par cet échangeur bitube dont le but est de véhiculer le fluide frigoporteur. Ce dernier entre dans l'échangeur par un tube central et ressort par un espace annulaire par écoulement retour jusqu'à un T inégal de séparation. Les 27 thermocouples permettant de mesurer la température du MCP sont disposés à différentes positions longitudinales et radiales par rapport à la paroi de l'échangeur (figure 2b). Suivant la position radiale autour de l'échangeur bitube, la première nappe de 9 thermocouples est positionnée en moyenne à une distance $r' = r - R = 1$ mm de la paroi du tube extérieur de l'échangeur, la seconde à 14 mm, et la troisième à environ 26 mm de la même paroi. Suivant l'axe de l'échangeur, ces thermocouples sont disposés dans trois plans transversaux espacés de 40 mm par groupe de 9 thermocouples dans chaque plan. Une rugosité contrôlée a été ajoutée à la paroi du tube par ponçage au papier de verre abrasif à faible taille de grains (classe 240 grit soit 53 μm) dans le but de faciliter la nucléation pariétale de l'eau limitant le phénomène de surfusion.

2.2. Acquisition et traitement de données

Une étape préliminaire aux essais a été de calibrer les différents thermocouples en utilisant un thermomètre à résistance de platine haute précision Pt100/AN 5848 de marque AOIP lui-même étalonné régulièrement au Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE). Par ailleurs, afin d'assurer la répétabilité des mesures de température par les thermocouples, les soudures froides des thermocouples ont été déportées dans une boîte en polystyrène isolée de l'ambiance dans laquelle une sonde Pt100 a été utilisée pour effectuer une compensation soude froide par mesure de la température de référence dans la boîte. Les essais ont été réalisés en hiver dans une salle non chauffée avec une température ambiante comprise entre 11°C et 12°C pendant les trois heures que dure chaque essai. Avant de commencer les essais de solidification du MCP, une étape importante consiste à faire fonctionner les deux bains thermostatés simultanément en fixant une consigne interne de température pour le bain contenant le fluide frigoporteur et une autre pour celui contenant le MCP, l'électrovanne 1 (entrée de l'échangeur bitube) étant en position fermée pendant que l'électrovanne 2 est ouverte. Ceci permet, après avoir défini un débit volumique de fluide frigoporteur traversant le débitmètre de faire circuler ce dernier seulement dans la boucle primaire BP jusqu'à une stabilisation de la consigne (sans aucune circulation dans l'échangeur bitube). Pendant ce temps, le fonctionnement du bain thermostaté contenant le MCP permet de faire circuler en boucle le volume de MCP contenu dans la section d'essai jusqu'à l'atteinte d'une température moyenne constante dans la section d'essai définissant ainsi une température initiale du MCP à solidifier. Par ailleurs, cette phase préliminaire permet de développer un champ de température initial stationnaire dans les parois du PMMA qui, malgré leur grande épaisseur sont sources de déperditions thermiques par conduction vers l'ambiance. L'essai de solidification démarre, une fois que ces deux consignes sont atteintes de façon stabilisée, par une ouverture de l'électrovanne 1 (entrée échangeur) synchronisée avec la fermeture de l'électrovanne 2 (boucle primaire) permettant ainsi une circulation du fluide frigoporteur dans la boucle globale BG, la centrale d'acquisition étant en mode acquisition. Au cours de chaque essai, la température ambiante est également mesurée à différents instants afin d'évaluer sa variation pendant les trois heures que dure chaque essai. Les essais ont été réalisés pour un nombre de Reynolds moyen $Re_d = 380$ à l'intérieur du tube central de l'échangeur bitube et pour deux valeurs de température initiale du MCP $T_{i1} = 3,9$ °C et $T_{i2} = 12,7$ °C, chaque essai de solidification ayant une durée de 3h. Pour tous les essais, le réservoir du bain thermostaté est régulé à une température constante $T_b = -8$ °C. Un appareil photo haute résolution a été utilisé pour visualiser le front de solidification sur les deux faces non instrumentées de la section d'essai en enregistrant une image de celle-ci à intervalles réguliers de 10 minutes. La mesure locale de température de

chacun des 27 thermocouples au fil du temps permet d'avoir l'évolution temporelle de la température moyenne des thermocouples pendant la solidification du MCP par la relation (1) suivante :

$$T_{MCP}(t) = \frac{1}{n} \sum_1^n T_i(t) \quad (1)$$

Des essais qualitatifs préliminaires de visualisation du front de solidification ont été effectués avant la mise en place des thermocouples afin d'évaluer l'influence de la présence des thermocouples sur la forme du front de solidification. Il a été observé en comparant la forme du front de solidification en présence et en l'absence de thermocouples que ceux-ci avaient un effet limité en raison du grand volume de MCP comparativement au volume occupé par les thermocouples qui induisent localement des perturbations mineures de l'écoulement.

3. Résultats et analyses

Dans cette section, les résultats issus des différentes acquisitions sont présentés et analysés. Dans un premier temps, les résultats qualitatifs de visualisation du front de solidification du MCP sont présentés et discutés pour les deux valeurs de température initiale. Puis, l'analyse des évolutions temporelles du champ de température du MCP est effectuée.

3.1. Analyse qualitative de l'évolution spatiotemporelle du front de solidification

Afin d'analyser le processus de solidification et notamment mettre en évidence l'influence de la température initiale du MCP sur le processus de solidification, la figure 3 présente les images du front de solidification sur la face transversale non instrumentée de la section d'essai pour les valeurs initiales de température $T_{i1}=3,9^{\circ}\text{C}$ et $T_{i2}=12,7^{\circ}\text{C}$. Ces deux températures ont été choisies pour être dans un cas légèrement en dessous de la température d'inversion de la dépendance masse volumique-température du MCP (environ 4°C , évolution monotone de la masse volumique entre 0°C et T_{i1}) et dans l'autre cas pour être clairement au-dessus de cette valeur (évolution non-monotone de la masse volumique de 0°C à T_{i2}) afin de bien identifier l'influence de l'inversion de la dépendance masse volumique-température sur le processus de solidification et indirectement sur le développement de la convection naturelle. Les limites de cette face sont représentées par le contour carré en trait continu. Le front de solidification est rendu visible par la différence de contraste avec le fond noir (plaque ABS de fond d'enceinte).

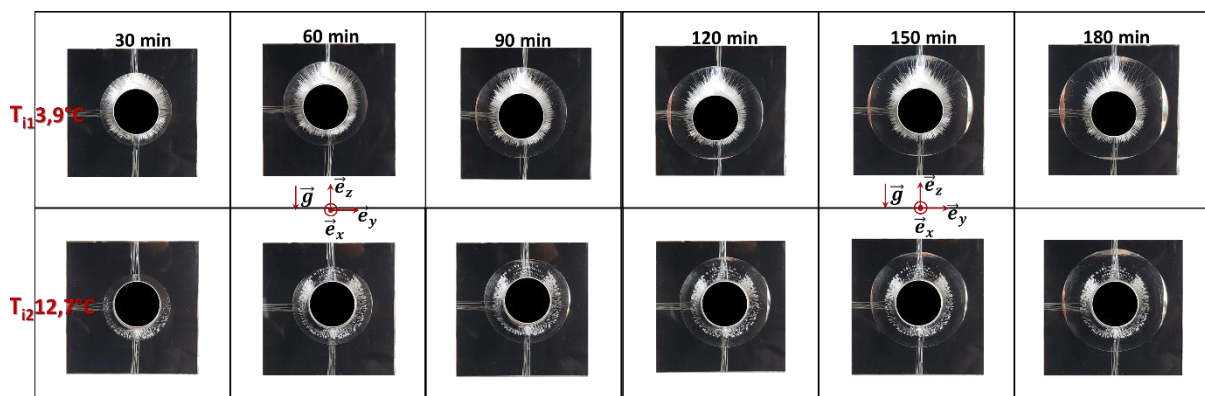


Figure 3 : Evolution du front de solidification pour deux valeurs de température initiales du MCP

On observe que le MCP se solidifie d'abord sur la paroi du tube, ceci étant clairement visible 30 minutes après le début de la solidification. Au fil du temps, l'épaisseur de la couche solidifiée délimitée par le front de solidification et le tube augmente avec une distribution

spatiale différente pour les deux valeurs de températures initiales. Pour une température initiale T_{i1} , le front de solidification présente à tout instant une asymétrie (par rapport à l'axe de l'échangeur bitube) orientée dans le sens contraire à la gravité. L'épaisseur de la couche de MCP solidifiée augmente logiquement jusqu'à la fin de l'essai où on peut voir une différence d'épaisseur nette entre le dessus et le dessous de l'échangeur. Pour la température initiale T_{i2} , l'épaisseur de la couche de MCP solidifiée est moins importante à 30 minutes par rapport à celle correspondant au même instant pour une température initiale $T_{i1}=3,9^{\circ}\text{C}$. Ceci est liée à la différence d'énergie thermique sensible à évacuer dans les deux cas avant d'atteindre la température de solidification du MCP (0°C). Contrairement à la température initiale $T_{i1}=3,9^{\circ}\text{C}$ où on observe une allure monotone de la distribution temporelle de couche de MCP solidifiée entre le dessus et le dessous du tube, celle correspondant à une température $T_{i2}=12,7^{\circ}\text{C}$ met en évidence une asymétrie orientée initialement dans le sens de la gravité au début de la solidification puis une asymétrie orientée dans le sens contraire à la gravité à la fin de l'essai mettant en évidence un effet notoire de la température initiale sur la forme du front de solidification. Afin de mieux analyser cet effet sur l'évolution du front de solidification, la figure 4 représente un zoom de la distribution locale de MCP solidifié 30 min et 180 min (fin de l'essai) après le début de la solidification.

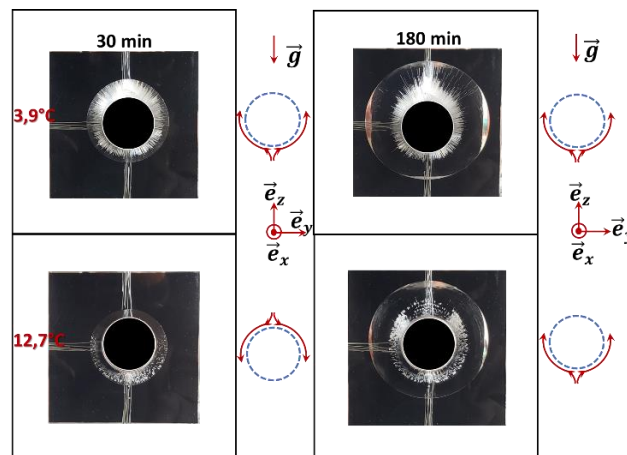


Figure 4 : Influence de la température initiale du MCP sur l'évolution du front de solidification

Sur cette figure, on voit clairement que la distribution locale de couches de MCP présente à 30 min une asymétrie inversée pour ces deux valeurs de températures initiales laissant penser à cet instant au développement autour du tube de mouvements fluidiques inverses, ascensionnels dans le cas de la température initiale $T_{i1}=3,9^{\circ}\text{C}$ et descendant pour la température initiale $T_{i2}=12,7^{\circ}\text{C}$. A la fin de l'essai, on peut clairement voir que les deux fronts de solidifications ont tous une asymétrie orientée dans le sens contraire à la gravité (laissant penser à cet instant à des mouvements fluidiques ascendant dans les deux cas de figure).

3.2. Analyse quantitative du processus de solidification

Afin d'effectuer une analyse semilocale et globale du processus de solidification, la figure 5 présente pour les deux valeurs de température initiales $T_{i1}=3,9^{\circ}\text{C}$ et $T_{i2}=12,7^{\circ}\text{C}$ les évolutions des moyennes de température des thermocouples par groupe de 9 : dans le plan médian vertical au-dessus du tube, dans le plan médian vertical en dessous du tube, dans le plan médian horizontal et enfin la moyenne d'ensemble des 27 thermocouples qui donne une indication sur la température moyenne instantanée du MCP pendant la solidification. On peut observer que pour la valeur de température initiale T_{i1} , tous ces profils ont une allure moyenne décroissante et monotone (figure 5a). La moyenne de température donnée par les thermocouples au-dessus de l'échangeur bitube est à tout instant inférieure à celle donnée par les thermocouples en

dessous de l'échangeur en raison de la croissance de la masse volumique de l'eau pure entre 0°C et le point d'inversion de la dépendance masse volumique-température (autour de 4°C) qui conduit à des valeurs négatives du coefficient d'expansion isobare induisant par conséquent des mouvements fluidiques ascendants à proximité du tube frigoporteur et des mouvements descendant au loin. Ceci a été également observé dans les travaux numériques récents de Dekhil et al [2-3]. La moyenne de température dans le plan médian horizontal ainsi que la température moyenne du MCP restent pendant tout le processus de solidification encadrées par les moyennes de température en dessous et au-dessus du tube ce qui traduit un maintien des mouvements ascensionnels au voisinage du front de solidification pendant toute la durée de la solidification (figure 5a). Ce mouvement ascensionnel est la raison de la dissymétrie orientée dans le sens contraire à la gravité observée précédemment sur le front de solidification (figure 3 et 4). L'analyse des profils analogues correspondant à une valeur de température initiale $T_{i2}=12,7$ °C montre un comportement complètement différent comme on peut le voir sur la figure 5b.

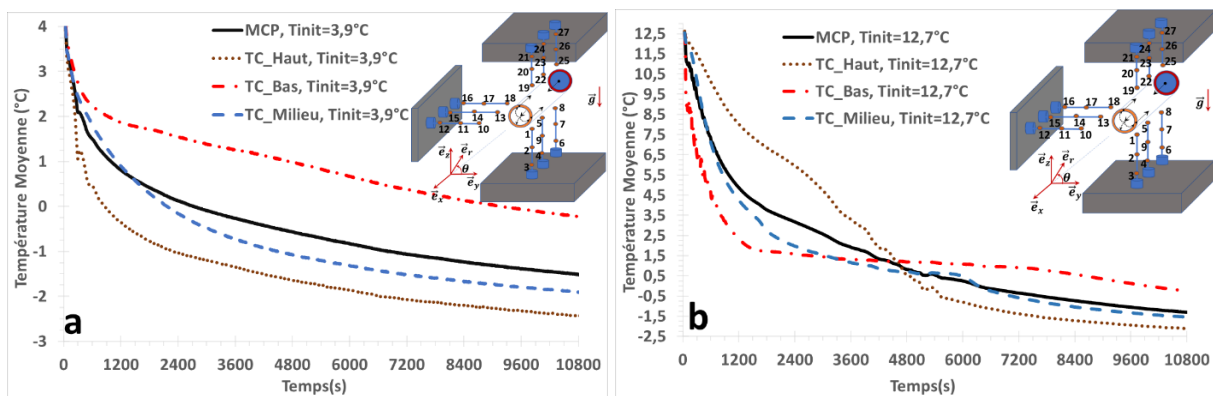


Figure 5 : Evolution spatio-temporelle globale du champ thermique

En effet, la moyenne de température des thermocouples situés au-dessus de l'échangeur bitube est supérieure à celle en dessous de l'échangeur jusqu'à environ 4800 s. Ceci traduit dans cette première phase de la solidification un comportement contraire à celui observé pour la température initiale $T_{i1}=3,9$ °C et indique dans cette phase des mouvements fluidiques descendants dans le voisinage du front de solidification et ascensionnels au loin. Ceci s'explique par le fait qu'entre le point d'inversion de la dépendance masse volumique-température de l'eau pure (4°C) et la température initiale $T_{i2}=12,7$ °C, la masse volumique a une évolution monotone et décroissante ce qui conduit à des valeurs positives du coefficient d'expansion isobare et par conséquent à des mouvements fluidiques descendant dans le voisinage de l'échangeur bitube pendant le refroidissement. Pendant cette phase, ces mouvements fluidiques ont pour effet d'induire une asymétrie orientée dans le sens de la gravité sur le front de solidification comme observée plus haut (figure 3 et 4). A partir d'environ 4800 s, on assiste à une inversion des profils temporels de moyenne de température entre le fluide au-dessus de l'échangeur bitube et celui en dessous synonyme d'une inversion des forces de flottabilité qui conduit à un renversement de l'écoulement. Entre 4800 s et jusqu'à la fin de la solidification l'arrangement des profils de température est similaire à celui correspondant à la valeur de température initiale $T_{i1}=3,9$ °C indiquant, dans cette seconde phase de la solidification, des mouvements ascensionnels dans le voisinage du front de solidification et des mouvements descendant au loin. Ceci a pour conséquence l'inversion de l'asymétrie observée sur le front de solidification qui passe d'une asymétrie orientée dans le sens de la gravité dans la première phase de la solidification à une symétrie, puis à une asymétrie orientée dans le sens contraire à la gravité dans la seconde phase de la solidification (figure 3 et 4). On peut ainsi distinguer deux régimes

thermiques lors de la solidification de l'eau pure selon la valeur de sa température initiale à savoir :

- un régime stable sans renversement de l'écoulement lorsque la température initiale de l'eau est en dessous du point d'inversion de la dépendance masse volumique-température
- un régime instable avec renversement de l'écoulement lorsque la température initiale de l'eau est supérieure à celle correspondant à ce point d'inversion.

Ces données expérimentales préliminaires, et la connaissance de ces deux régimes, permettent d'alimenter la base de données de la littérature scientifique dans le cas particulier de la fusion-solidification d'un MCP présentant une anomalie dilatométrique, i.e. ayant un point d'inversion de la masse volumique dans la phase liquide, comme l'eau dans le but d'améliorer les modèles de prédiction du changement de phase en prenant en compte ce phénomène.

4. Conclusion et perspectives

Cette étude avait pour objectif l'analyse expérimentale du processus de solidification de l'eau pure pour une application au stockage de froid. Deux valeurs de température initiale de l'eau (autour et au loin du point d'inversion de la dépendance masse volumique-température), ont été étudiées en employant une technique de visualisation du front de solidification et de thermométrie locale. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- la forme du front de solidification de l'eau pure autour d'un tube frigoporteur horizontal est fortement influencée par sa température initiale : pour une température initiale inférieure au point d'inversion de la dépendance masse-volumique température, on observe une asymétrie du front de solidification orientée dans le sens contraire à la gravité ; dans le cas d'une température initiale supérieure au point d'inversion, on observe une asymétrie du front de solidification orientée dans un premier temps dans le sens de la gravité suivie d'une inversion.
- le processus de solidification de l'eau pure peut être décomposé en deux régimes thermiques : un régime stable sans renversement de l'écoulement lorsque la température initiale de l'eau est en dessous du point d'inversion de la dépendance masse volumique-température ; un régime thermique instable avec renversement de l'écoulement lorsque la température initiale de l'eau est supérieure à celle correspondant au point d'inversion.

Des travaux complémentaires sont en cours afin de caractériser ce processus de solidification dans une plage de température initiale plus large. Ces essais permettront par la suite de développer un modèle général de prédiction du processus de fusion-solidification de MCP incluant l'anomalie dilatométrique.

Références

- [1] MA Dekhil, JV Simo Tala, O Bulliard-Sauret, D Bougeard, Development of an innovative heat exchanger for sensible heat storage in agro-food industry, Appl. Thermal Eng., Vol. 177, Aug. 2020, 115412
- [2] MA Dekhil, JV Simo Tala, O Bulliard-Sauret, D Bougeard, Numerical analysis of the performance enhancement of a latent heat storage shell and tube unit using finned tubes during melting and solidification, Applied Thermal Engineering, Volume 192, 25 June 2021, 116866
- [3] MA Dekhil, JV 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, Vol. 56, Part A, 1 Dec. 2022, 105892

- [4] V. Safari, H. Abolghasemi, L. Darvishvand, B. Kamkari, Thermal performance investigation of concentric and eccentric shell and tube heat exchangers with different fin configurations containing phase change material, *Journal of Energy Storage* Volume 37, May 2021, 102458
- [5] B. Kamkari, H. Shokouhmand, F. Bruno, Experimental investigation of the effect of inclination angle on convection-driven melting of phase change material in a rectangular enclosure, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 72 (2014), pp. 186-200
- [6] Z.-J. Zheng, Y. Xu, M.-J. Li, Eccentricity optimization of a horizontal shell-and-tube latent-heat thermal energy storage unit based on melting and melting-solidifying performance, *Appl. Energy.*, 220 (2018), pp. 447-454
- [7] H. Sait, Experimental study of water solidification phenomenon for ice-on-coil thermal energy storage application utilizing falling film, *App. Thermal Eng.* Vol. 146, 5 Jan. 2019, pp 135-145
- [8] M.B. Guilherme, T.K. Fernando, J.L.H. Christian, A study of automatic icemaking in household refrigerators, *International Journal of Refrigeration* 142 (2022) 127–136

Remerciements

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier de l'IMT Nord Europe et de l'Institut CARNOT-MINES à qui nous adressons nos sincères remerciements