



HAL
open science

Influence des paramètres de modélisation sur la simulation numérique d'un module de stockage thermique par chaleur latente avec ailettes circulaires

Clément Beust, Erwin Franquet, Jean-Pierre Bedecarrats, Pierre Garcia,
Jérôme Pouvreau

► To cite this version:

Clément Beust, Erwin Franquet, Jean-Pierre Bedecarrats, Pierre Garcia, Jérôme Pouvreau. Influence des paramètres de modélisation sur la simulation numérique d'un module de stockage thermique par chaleur latente avec ailettes circulaires. SFT 2018, Congrès de la Société Française de Thermique, May 2018, Pau, France. hal-02144716

HAL Id: hal-02144716

<https://hal.science/hal-02144716>

Submitted on 11 Jun 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Influence des paramètres de modélisation sur la simulation numérique d'un module de stockage thermique par chaleur latente avec ailettes circulaires

Clément BEUST^{1,2*}, Erwin FRANQUET², Jean-Pierre BEDECARRATS², Pierre GARCIA¹, Jérôme POUVREAU¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CEA, LITEN, DTBH, Laboratoire de Stockage Thermique
17 avenue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9

²Univ. Pau & Pays Adour, Laboratoire de Thermique, Energétique et Procédés – IPRA, EA 1932, Bâtiment d'Alembert, Rue Jules Ferry, BP 7511, 64075, PAU Cedex

*(auteur correspondant : clement.beust@cea.fr)

Résumé – Cette étude s'intéresse à la simulation numérique de la fusion et de la solidification d'un Matériau à Changement de Phase (MCP) dans un système de stockage thermique de type tubes et calandre avec ailettes circulaires externes. Les calculs sont comparés à des résultats expérimentaux pour la charge et pour la décharge. On observe l'effet de deux paramètres, la constante de zone pâteuse et la plage de changement de phase, sur la température du MCP et le temps de fusion : s'ils influencent la phénoménologie générale, ils affectent peu les performances globales du module de stockage étudié.

Nomenclature

CFD Computational Fluid Dynamics

DSC Differential Scanning Calorimetry

MCP Matériau à Changement de Phase

A_{mush} constante de zone pâteuse (*mushy zone*)

c_p capacité thermique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

\vec{g} accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$

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

P pression, Pa

t temps, s

T température, K

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

Y_l fraction liquide

Symboles grecs

β coefficient d'expansion volumique, K^{-1}

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

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

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices et exposants

p paroi

ref référence

1. Introduction

Le stockage thermique par chaleur latente consiste à exploiter la transition de phase solide / liquide d'un MCP pour stocker de la chaleur. Le MCP solide accumule de la chaleur en fondant, et la restitue en se re-solidifiant. En tant que matériaux de stockage de chaleur, les MCP ont pour avantage de peu varier en température entre la charge et la décharge, et de permettre une forte densité de stockage en comparaison des technologies de stockage par chaleur sensible [1].

De nombreux phénomènes physiques interviennent lors de la fusion ou la cristallisation de MCP. L'un des plus notables est la convection naturelle qui se met en place dans le MCP en phase liquide, du fait des différences de masse volumique induites par les gradients de température en son sein [2]. Lorsque les dimensions et la géométrie du système de stockage permettent le développement de boucles de convection, la contribution de ces mouvements liquides aux transferts de chaleur devient importante [3–5]. Un modèle visant à prédire l'état

de charge d'un système de stockage latent se doit ainsi de représenter correctement ces mouvements de convection.

Le modèle dit « enthalpie-porosité », proposé par Voller et Prakash [6], permet de simuler les phénomènes de fusion et de solidification. Il tient compte de l'écoulement dans le MCP liquide et dans la zone pâteuse qui sépare les zones solide et liquide, ainsi que de l'absence de mouvements internes dans le MCP solide. L'écoulement du MCP liquide est freiné dans la zone pâteuse ; l'amplitude de ce freinage est représentée dans le modèle par une constante dont le choix de la valeur n'est à priori pas immédiat.

Quelques études [4–8] ont montré que la valeur de cette constante dite de *mushy zone* pouvait avoir une influence importante sur la vitesse du changement de phase, et sur la forme du front de fusion ou de solidification. Les températures auxquelles le MCP commence et termine sa transition ont également une influence [7] : en effet, plus il change de phase sur une grande plage de température, plus la zone pâteuse est épaisse. L'objectif de la présente étude est d'évaluer l'impact de ces paramètres sur la charge et la décharge d'un système de stockage de type tubes-calandre de taille laboratoire, construit au centre CEA de Grenoble. Les résultats de simulation, obtenus à l'aide du logiciel ANSYS Fluent®, sont comparés aux résultats expérimentaux, afin de valider le modèle numérique et d'identifier les paramètres du modèle permettant le meilleur accord avec la réalité.

2. Description du cas d'étude

Le module de stockage de chaleur étudié est constitué d'une calandre en PMMA (polyméthacrylate de méthyle acrylique) remplie de MCP, au milieu de laquelle passe un tube en acier dans lequel circule le fluide caloporteur. Le tube est muni d'ailettes circulaires en aluminium sur sa surface externe. Le fluide caloporteur utilisé est de l'eau. À l'intérieur du tube se trouve un insert cylindrique en plastique (PEEK), dont le rôle est de limiter les mouvements de convection naturelle dans le fluide caloporteur.

Deux thermocouples (type K) mesurent la température du fluide caloporteur en amont et en aval de la calandre, à 31 et 77 mm respectivement des brides supérieure et inférieure. À 5 positions axiales notées de A à E (Figure 1), éloignées de 351, 273, 195, 117 et 39 mm de la bride inférieure, 8 thermocouples ont été disposés dans le MCP selon le motif visible Figure 2. Les deux couronnes de thermocouples se situent à 6 mm et 14 mm de la paroi externe du tube. Le module de stockage présente une symétrie axiale ; au cours des essais, l'écart moyen relevé entre les mesures des thermocouples d'une même couronne est inférieur à 0,5°C. Ainsi, les résultats expérimentaux présentés ici (partie 4) résultent, pour une position axiale et radiale donnée, d'une moyenne des quatre thermocouples concernés selon la position azimutale.

Le MCP utilisé est une paraffine nommée RT35-HC [9], fournie par la société Rubitherm® ; il s'agit d'eicosane (alcane avec 20 atomes de carbone), dont la transition de phase s'effectue autour de 35°C. Afin de déterminer ses propriétés thermophysiques, le MCP a été caractérisé par DSC, à l'aide d'un calorimètre μ DSC7evo. Les courbes de capacité thermique apparente mesurées sont tracées Figure 3. Le pic observé vers 32°C en solidification uniquement correspond à une transition de phase solide-solide [10] ; à l'exception de ce pic, les courbes sont les mêmes en fusion et en solidification. L'enthalpie de changement de phase a été estimée graphiquement (méthode des tangentes) sur la courbe mesurée en fusion, puis recalée de manière à obtenir le même temps de fusion en charge dans la simulation que dans l'expérience. La valeur retenue (246 kJ.kg⁻¹) est cohérente avec l'incertitude donnée par le fournisseur [9], et avec d'autres mesures effectuées sur l'eicosane. [10] Les valeurs adoptées pour les propriétés du MCP sont rassemblées dans le Tableau 1. Pour l'eau et les autres matériaux (métal, PMMA, PEEK), les valeurs des propriétés physiques proviennent de [11].

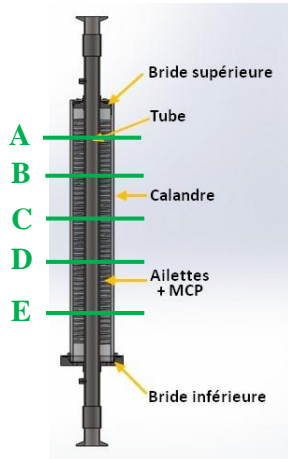


Figure 1 : Schéma de la section d'essai

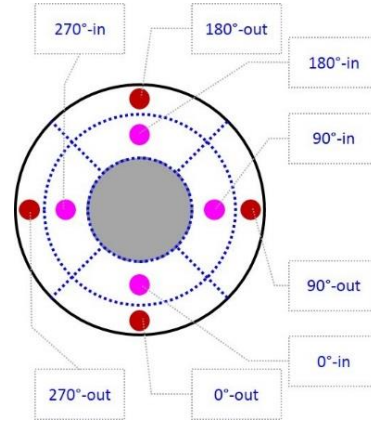


Figure 2 : Disposition radiale et azimutale des thermocouples dans le MCP

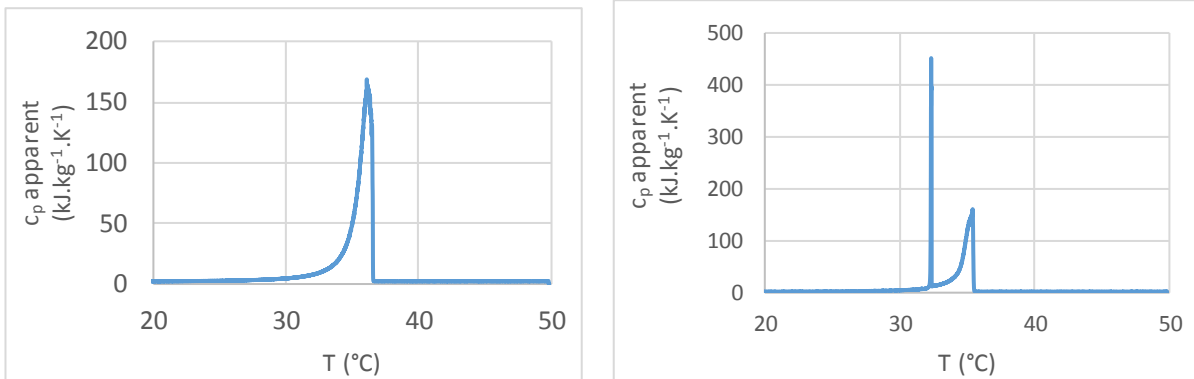


Figure 3 : Capacité thermique apparente de la RT35-HC mesurée par DSC ($0,01 \text{ K.min}^{-1}$)
À gauche : fusion ; À droite : solidification

	c_p	ρ	λ	β	μ	L
	$\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$	kg.m^{-3}	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	K^{-1}	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$	kJ.kg^{-1}
RT35-HC solide	2219	789,5	0,20	-	-	246
RT35-HC liquide	2323			$7,14.10^{-4}$	$3,1.10^{-3}$	

Tableau 1 : Propriétés de la RT35-HC pour le modèle [10,12]. Valeurs en gras issues des mesures.

3. Description du modèle CFD

3.1. Modélisation du MCP – Modèle enthalpie-porosité de Voller

Le MCP est représenté par les équations de Navier–Stokes incompressibles classiques, modifiées afin de tenir compte respectivement de la chaleur latente du MCP et de l'absence de mouvements au sein de la phase solide. [6] La convection naturelle est prise en compte via l'approximation de Boussinesq. La masse volumique est prise constante, le phénomène d'expansion et de contraction volumique du MCP lors du changement de phase n'étant pas modélisé. Les équations régissant l'écoulement sont donc [13] :

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

$$\rho \left(\frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} \right) = -\nabla P + \nabla(\mu \nabla \vec{v}) + \rho \beta (T - T_{ref}) \vec{g} + A \vec{v} \quad (2)$$

$$\rho c_p \left(\frac{dT}{dt} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla(\lambda \nabla T) - \rho L \left(\frac{dY_l}{dt} + \vec{v} \cdot \nabla Y_l \right) \quad (3)$$

La fraction massique Y_l est une fonction linéaire de la température qui vaut 0 lorsque le MCP est entièrement solide localement, et 1 lorsque le MCP est entièrement liquide. Elle est définie de la manière suivante :

$$\begin{cases} Y_l(T < T_s) = 0 \\ Y_l(T_s < T < T_l) = \frac{T - T_s}{T_l - T_s} \\ Y_l(T > T_l) = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Les températures T_s et T_l , dites de solidus et de liquidus, délimitent la plage de température sur laquelle s'effectue le changement de phase.

Le terme de rappel $A\vec{v}$ de l'équation de quantité de mouvement (2) est nul lorsque le MCP est liquide ($Y_l = 1$), et prend des valeurs très grandes lorsque le MCP est solide ($Y_l = 0$) ; il domine alors les autres termes de l'équation, ce qui a pour effet de contraindre la vitesse à être nulle. Le facteur A est défini comme suit :

$$A = -A_{mush} \frac{(1 - Y_l)^2}{Y_l^3 + \varepsilon} \quad (5)$$

Ce terme est croissant à mesure que Y_l diminue : dans la zone pâteuse, où liquide et solide coexistent ($0 < Y_l < 1$), les mouvements de MCP liquide sont de plus en plus difficiles à mesurer que la phase solide occupe l'espace. La valeur de la constante de *mushy zone* A_{mush} détermine l'amplitude de l'amortissement de la vitesse. Elle doit être suffisamment grande pour immobiliser le solide, mais ne pas être trop élevée pour que l'amortissement corresponde à la réalité. La valeur optimale est fortement dépendante du cas d'étude ; les valeurs adoptées dans la littérature vont de 10^3 à 10^{10} . Le terme ε au dénominateur permet d'éviter la division par zéro ; dans cette étude, il est pris constant égal à 10^{-3} .

3.2. Géométrie et maillage, conditions initiales et aux limites

Le domaine de calcul 2D axisymétrique comprend la calandre remplie de MCP, la conduite annulaire de fluide caloporteur, ainsi que le tube et l'insert cylindrique. Le tube, la conduite et l'insert sont prolongés 30 cm au-delà de la position des deux thermocouples côté eau, afin de s'assurer que l'écoulement soit bien établi hydrauliquement lorsqu'il arrive au thermocouple côté injection.

La température initiale est uniforme. La température d'injection de l'eau suit l'évolution temporelle mesurée expérimentalement. Toutes les parois externes sont adiabatiques, à l'exception de celle de la calandre qui est sujette à des pertes thermiques. En charge, le coefficient de pertes avec l'extérieur a été fixé de manière à ce que la température du MCP en fin d'essai concorde avec l'expérience ; la valeur adoptée est de $20 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$. En décharge, les pertes thermiques sont négligées (paroi adiabatique) car leur influence est moindre.

Le maillage comprend 109908 mailles ; dans le MCP, les mailles sont carrées, et ont pour côté 0,35 mm, soit l'épaisseur d'une ailette. Le pas de temps du calcul transitoire est fixe et vaut 0,25s. La convergence en pas de temps et en maillage a été vérifiée en comparant les résultats à ceux obtenus pour un pas de temps de 0,1s et pour un maillage avec des mailles quatre fois plus petites dans le MCP (366468 mailles).

4. Résultats

4.1. Influence de la constante de zone pâteuse (*mushy zone*)

Plusieurs calculs avec différentes valeurs de la constante de *mushy zone* (de 10^3 à 10^7) ont été effectués sur un cas de charge avec injection de fluide caloporteur par le haut, pour un débit de $9,14 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. Les températures de solidus et de liquidus adoptées sont de $T_s = 33^\circ\text{C}$ et $T_l = 35^\circ\text{C}$; il s'agit de la plage de changement de phase observée expérimentalement.

L'évolution de la température dans le MCP est représentée Figure 4. Comme on peut le voir, pour $10^3 < A_{mush} < 10^7$, la température prédite par le calcul est en bon accord avec l'expérience, pour toutes les positions axiales et radiales considérées dans la section d'essais.

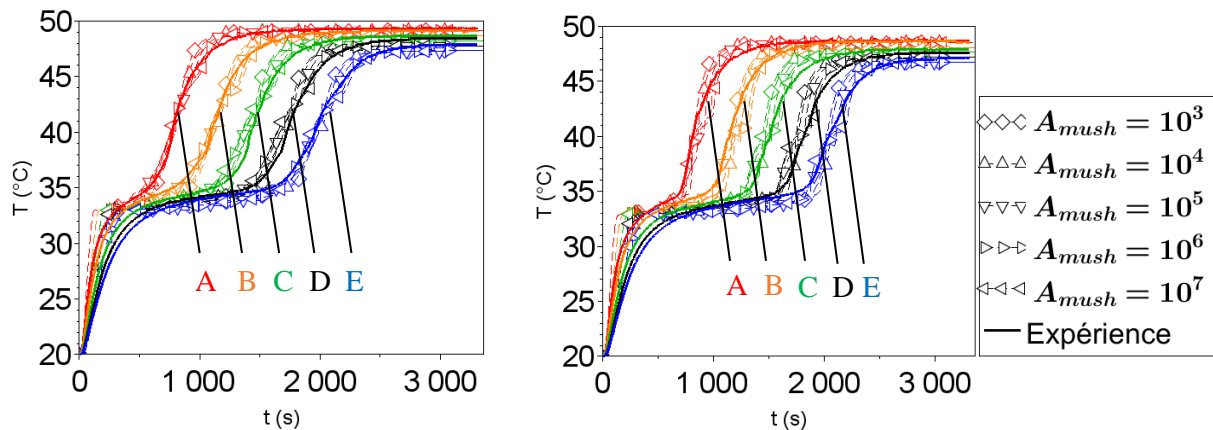


Figure 4 : Évolution de la T_{MCP} selon la valeur de la constante de *mushy zone* (charge par le haut)
À gauche : thermocouples situés près du tube ; À droite : thermocouples situés près de la calandre

Le temps nécessaire pour fondre 95% du MCP présent dans la calandre varie de 220s environ entre les calculs avec $A_{mush} = 10^3$ et $A_{mush} = 10^7$, soit environ 11% (cf. Tableau 2). Cette influence relativement faible de A_{mush} montre que les transferts de chaleur par conduction thermique sont dominants par rapport aux transferts par convection. Les ailettes étant nombreuses et proches les unes des autres, peu de place est laissée pour le développement de boucles de convection naturelle dans la phase liquide. La constante de *mushy zone* affecte également l'avancée du front de fusion. La zone située entre les ailettes et la calandre fond plus vite pour les faibles valeurs. En effet, la convection naturelle contribue plus fortement à la fusion du MCP dans cette zone plus éloignée des ailettes. En conséquence, pour $A_{mush} \geq 10^5$, la pente de la courbe diminue sur une période d'environ 200s durant la montée en température qui suit la fusion (Figure 5). Cette période correspond au changement de phase du MCP proche de la calandre, qui s'effectue plus lentement.

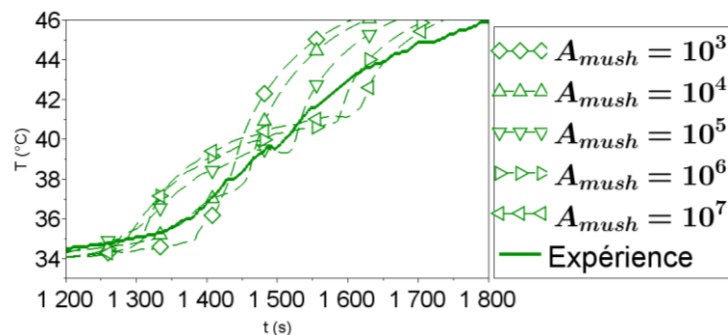


Figure 5 : Montée en température des thermocouples proches calandre (C), après la fusion

A_{mush}	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
Temps de fusion (s)	1885	1949	2026	2086	2106

Tableau 2 : Temps nécessaire pour fondre 95% du MCP, selon la constante de mushy zone

4.2. Variation de la plage de changement de phase

Des calculs avec quatre plages de changement de phase différentes ont été effectués sur le même cas de charge par le haut. Afin d'observer l'influence de l'étalement en température du changement de phase indépendamment de ses températures de début et de fin, les plages choisies sont toutes centrées autour de 34°C, point médian observé expérimentalement. Les calculs sont effectués avec $A_{mush} = 10^4$, valeur permettant le meilleur accord avec l'expérience.

L'évolution des températures est représentée Figure 6. L'accord avec l'expérience est globalement bon pour toutes les plages testées. L'évolution de la température au niveau du plateau de changement de phase varie selon les calculs. Le plateau est d'autant plus pentu que la fusion est étalée en température, ce qui est logique (Figure 7).

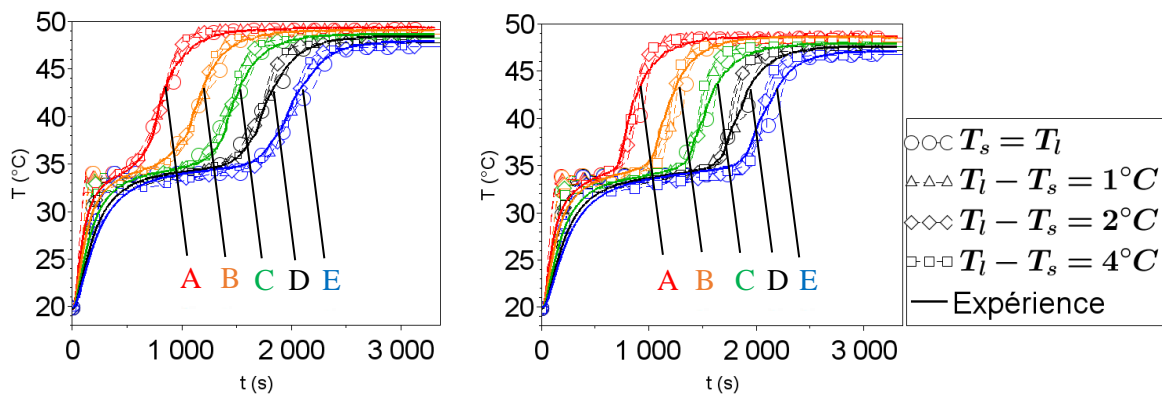


Figure 6 : Évolution de T_{MCP} pour différentes plages de changement de phase
À gauche : thermocouples situés près du tube ; À droite : thermocouples situés près de la calandre

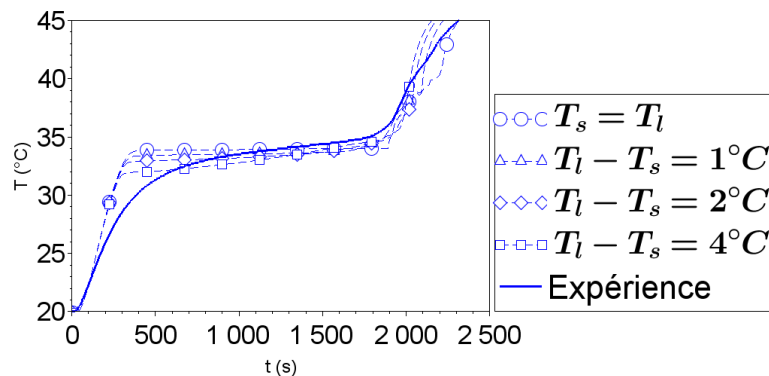


Figure 7 : Évolution de T_{MCP} au niveau du plateau de changement de phase, pour différentes largeurs de la plage de changement de phase (thermocouple E proche calandre)

On peut noter qu'aucun des calculs ne reproduit fidèlement l'évolution de température observée expérimentalement. Les calculs font apparaître un plateau de changement de phase plus net que dans l'expérience. Une cause possible de cet écart est le fait que le modèle ne prend pas en compte l'évolution progressive de la capacité thermique apparente du MCP. La relation linéaire entre la fraction liquide et la température (équation 4) suggère une absorption de chaleur répartie uniformément pendant la fusion. Comme on peut le voir Figure 3,

l'absorption de chaleur n'est pas uniforme et présente plutôt un pic autour du point de fusion. Par ailleurs, la capacité thermique sensible du solide varie avec la température, ce qui n'est pas pris en compte par le modèle. Cela peut expliquer la montée en température plus rapide avant la fusion et le fait que l'on n'ait pas expérimentalement de rupture de pente au début du plateau.

4.3. Simulation de la décharge par le bas

Un calcul a été effectué sur un cas de décharge du module de stockage avec injection par le bas (débit de fluide caloporteur : $9,08 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$). Comme pour la charge par le haut, les températures de début et de fin de cristallisation (34°C et 33°C) sont adoptées comme valeur de T_1 et T_s respectivement. L'évolution de la température du MCP est représentée Figure 8.

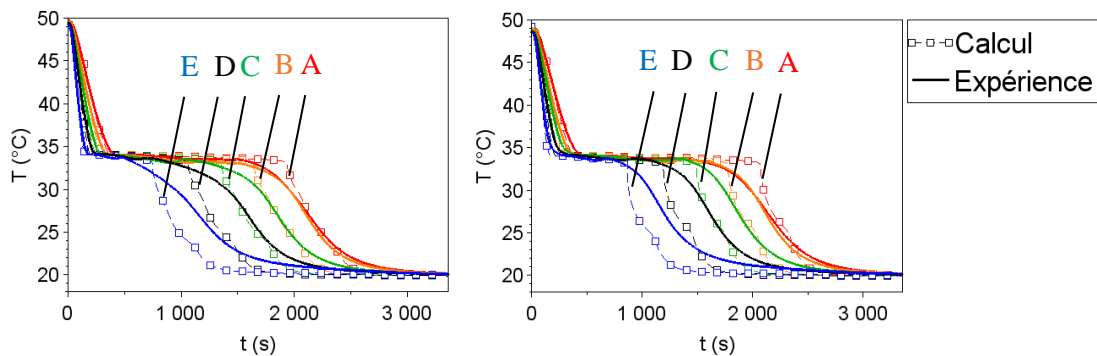


Figure 8 : Évolution de T_{MCP} pour le calcul de la décharge par le bas
 À gauche : thermocouples situés près du tube ; À droite : thermocouples situés près de la calandre

L'accord avec les résultats expérimentaux est ici moins bon que pour le cas de la charge. On observe deux écarts majeurs à l'expérience. Le premier concerne l'homogénéité de la température dans le haut de la calandre qui n'est pas reproduite par le calcul. Cet effet pourrait être lié au rétreint volumique de la paraffine : une fois tout le MCP cristallisé, le niveau liquide a baissé dans le haut de la calandre. Les thermocouples A se retrouvent alors dans le ciel gazeux qui surplombe le MCP ; leur température est ainsi proche de celle des thermocouples B qui se trouvent non loin en-dessous de la surface libre, voire possiblement dans l'air également. Le modèle se montre ainsi moins adapté pour simuler des cas où le changement de volume du MCP a une influence non négligeable. Le second écart concerne l'évolution de la température après le changement de phase : le refroidissement sensible du solide est plus rapide dans le calcul que dans l'expérience. Là encore, l'absence de prise en compte des variations de la capacité thermique du solide avec la température pourrait être la cause de cet écart.

5. Conclusion

Les paramètres du modèle enthalpie-porosité pour la simulation du changement de phase solide/liquide ont été étudiés afin de comprendre leur influence, sur le cas de la charge par le haut d'un module de stockage de chaleur par MCP de type tubes et calandre. La constante de *mushy zone* a peu d'impact sur la température, bien qu'elle influence localement la phénoménologie de la fusion. La plage de changement de phase a une influence sur la pente du plateau de température caractéristique de la transition de phase.

L'influence des deux paramètres étudiés sur les performances globales du système s'avère relativement faible. La convection naturelle n'est pas le mode de transfert de chaleur dominant ici, du fait de la forte densité d'ailettes qui limite la mise en mouvement du MCP. Ainsi, un changement dans le comportement de la zone pâteuse affecte le changement de phase à l'échelle locale uniquement. Il s'agit d'un résultat à mettre en regard de ceux constatés sur d'autres

géométries [4, 5, 7] : dès lors que le développement de boucles de convection importantes est permis, ces deux paramètres ont une influence bien plus grande. L'impact de la zone pâteuse, et donc des paramètres du modèle, peut ainsi varier fortement d'un cas à l'autre.

Le modèle numérique a été validé sur un cas de charge par le haut, mais pas pour la simulation d'une décharge par le bas. La comparaison avec l'expérience met en évidence deux pistes d'amélioration du modèle. La première serait la prise en compte de l'expansion et du rétreint volumique au changement de phase. La deuxième serait de modéliser de manière plus précise la capacité thermique apparente du MCP, en tenant compte d'une part des variations de la capacité thermique sensible avec la température, et en rendant compte d'autre part de la forme du pic constaté pour la chaleur latente sur les mesures DSC.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier Fabrice Bentivoglio et Jean-François Fourmigué pour leurs conseils donnés au cours de ce travail.

Références

- [1] L. F. Cabeza, C. Sole, A. Castell, E. Oro, et A. Gil, Review of Solar Thermal Storage Techniques and Associated Heat Transfer Technologies, *Proceedings of the IEEE*, 100-2 (2012), 525–538
- [2] G. Ziskind, Modelling of heat transfer in phase change materials (PCMs) for thermal energy storage systems, *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, Elsevier (2015), 307–324
- [3] P. Garcia, M. Olcese, et S. Rougé, Experimental and Numerical Investigation of a Pilot Scale Latent Heat Thermal Energy Storage for CSP Power Plant, *Energy Procedia*, 69 (2015), 842–849
- [4] H. Shmueli, G. Ziskind, et R. Letan, Melting in a vertical cylindrical tube, Numerical investigation and comparison with experiments, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53-19/20 (2010), 4082–4091
- [5] M. Kumar et D. J. Krishna, Influence of Mushy Zone Constant on Thermohydraulics of a PCM, *Energy Procedia*, 109 (2017), 314–321
- [6] V. R. Voller et C. Prakash, A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30-8 (1987), 1709–1719
- [7] A. C. Kheirabadi et D. Groulx, The Effect of the Mushy-Zone Constant on Simulated Phase Change Heat Transfer, *Proceedings of CHT-15* (Rutgers University, Piscataway, USA, 25-29 mai 2015)
- [8] S. Arena, E. Casti, J. Gasia, L. F. Cabeza, et G. Cau, Numerical simulation of a finned-tube LHTES system: influence of the mushy zone constant on the phase change behaviour, *Energy Procedia*, 126-C (2017), 517–524
- [9] Rubitherm GmbH, dernier accès le 21/12/2017 : <http://www.rubitherm.eu/en/>
- [10] C. Vélez, M. Khayet, et J. M. Ortiz de Zárate, Temperature-dependent thermal properties of solid/liquid phase change even-numbered n-alkanes: n-Hexadecane, n-octadecane and n-eicosane, *Applied Energy*, 143-C (2015), 383–394
- [11] M. Martinelli, Stockage d'énergie thermique par changement de phase – Application aux réseaux de chaleur, thèse de doctorat Thermique, Université Grenoble Alpes (2016), Français
- [12] H. O. Baled *et al.*, Viscosity of n-hexadecane, n-octadecane and n-eicosane at pressures up to 243MPa and temperatures up to 534K, *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 72-C (2014), pp. 108–116
- [13] ANSYS Fluent Theory Guide Release 17.2 (2016)