

# Analyse des transferts thermiques dans un matériau à changement de phase dopé en conductivité.

Mariam JADAL<sup>1,2\*</sup>, Kevin MERLIN<sup>1,2</sup>, Didier DELAUNAY<sup>1</sup>, Lingai LUO<sup>1</sup>, Jérôme SOTO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Thermocinétique de Nantes, Polytech'Nantes – UMR 6607  
La Chantrerie, rue Christian Pauc – 44306 Nantes Cedex 3

<sup>2</sup>Institut Catholique d'Arts et Métiers de Nantes  
35 avenue du Champ de Manœuvres, 44470 Carquefou

\*(auteur correspondant : [mariam.jadal@univ-nantes.fr](mailto:mariam.jadal@univ-nantes.fr))

**Résumé** – Un modèle numérique d'un dispositif expérimental permettant de valider le comportement thermique d'une plaque de matériau à changement de phase dans une structure conductrice pendant les phases de fusion et solidification, a été développé sous Comsol Multiphysics. Ce système a été aussi utilisé pour déterminer à partir d'une méthode inverse sous Matlab, la conductivité thermique plane d'une plaque de matériau composite et d'étudier la résistance thermique de contact entre l'échantillon et un élément chauffant/refroidissant. Le modèle numérique utilise la méthode du Cp apparent pour la modélisation du changement de phase du matériau composite. Cette même méthode numérique a été reprise pour étudier le comportement thermique du matériau composite dans un échangeur stockeur multitube, composé de plusieurs plaques, pendant les phases de stockage et déstockage (fusion/solidification). Le modèle a été confronté aux résultats expérimentaux obtenus sur le démonstrateur.

## Nomenclature

$R_{tc}$  Résistance thermique de contact [ $W^{-1}.m^2.K$ ]

$C_p$  Capacité thermique massique [ $kJ.Kg^{-1}.K^{-1}$ ]

$T$  Température [K]

$\lambda$  Conductivité thermique [ $W.m^{-1}.K^{-1}$ ]

## I. Introduction

Les procédés discontinus incluant un cyclage thermique sont largement présents dans l'industrie. Ils peuvent impliquer de fortes consommations d'énergie en chauffage et en refroidissement. La récupération de l'énergie fatale sous forme de chaleur et sa valorisation est au cœur des problématiques actuelles. Cependant, les installations nécessitent des puissances élevées, rendant la plupart des solutions de stockage peu adaptées.

L'objectif de cet article est de proposer une solution performante et compacte. Pour cela, un concept de stockage par chaleur latente dopé en conductivité thermique a été développé. Le stockage est basé sur une technologie intégrant une structure conductrice de Graphite Naturel Expandé (GNE), imprégnée par un Matériau à Changement de Phase (MCP). Ce système présente des résultats les plus prometteurs [1] pour des applications industrielles avec des cycles thermiques courts. Le matériau composite GNE-MCP est fabriqué par compression uniaxiale des vermicules de graphite. Cette compression permet la formation d'une matrice de graphite, induisant une orientation de plans de graphite suivant le plan des plaques (direction orthogonale à la compression) et une structure orthotrope du matériau composite. Ceci conduit à une

conception du stockage où le fluide caloporteur traverse orthogonalement le réseau de plaques dans lesquelles les transferts dans le plan sont privilégiés.

Un modèle numérique 3D d'un dispositif expérimental permettant d'imposer une variation brusque de température suivant la direction plane d'une plaque de matériau composite a été développé sous Comsol Multiphysics. Cette plaque constitue le module élémentaire du stock. Elle permet de valider le modèle de simulation avec des conditions aux limites parfaitement maîtrisées et une instrumentation fine. Par ailleurs, une méthode inverse permet de déterminer les caractéristiques thermiques du matériau, et la résistance thermique de contact entre l'échantillon et un élément chauffant/refroidissant.

A partir de la même méthode numérique, cette fois en 2D dans le plan, un modèle d'un échangeur stockeur multitube et multi plaques a été développé sous Comsol Multiphysics associé à Matlab. Ce modèle a été utilisé pour étudier le transfert thermique du matériau composite dans le stock, pendant les phases de stockage et déstockage (fusion/solidification). Le modèle a été confronté aux résultats expérimentaux obtenus sur une maquette.

## **II. Validation du modèle thermique sur une plaque unitaire**

Un dispositif expérimental permettant de valider un modèle d'une plaque de matériau composite pendant la fusion et la solidification, est présenté dans cet article. Cette plaque est un élément unitaire d'un stock. Le modèle numérique du dispositif est développé sous Comsol Multiphysics en 3D. Ce modèle utilise la méthode classique du « Cp apparent », détaillée, par exemple, par Borreguero et al. [2] pour la modélisation du changement de phase du matériau.

Le matériau composite est composé d'une fraction massique de GNE, de densité 0.2, de 20% pour 80% de paraffine RT82 de RUBITHERM<sup>®</sup> dont les propriétés sont présentées en [4]. La plaque est de dimension 143x143x20mm. Le système consiste à imposer une variation brusque unidirectionnelle de température au matériau suivant sa direction plane au moyen d'un élément chauffant/refroidissant en cuivre, dans lequel circule un fluide caloporteur régulé par un bain thermostaté. De manière à imposer une variation de température brusque, un by-pass est réalisé sur le circuit fluide, au moyen de deux vannes trois voies pour permettre de préchauffer ou prérefroidir le fluide en boucle fermée. Des plaques de téflon entourent l'échantillon afin de limiter les pertes thermiques dans la direction transverse. Un isolant thermique en mousse de polyuréthane est placé autour de cet ensemble pour limiter les pertes thermiques latérales. Deux échangeurs ont été placés sur les parties supérieure et inférieure du dispositif. Ces derniers permettent d'obtenir des conditions initiales uniformes en température et également de contrôler plus facilement les conditions aux limites lors des essais. Afin d'anticiper la dilatation thermique du matériau, la dimension de la pièce de cuivre est légèrement supérieure à l'épaisseur de la plaque. Une instrumentation fine est réalisée au moyen de micro-thermocouples, disposés dans l'échantillon et à ses interfaces pour la connaissance des conditions aux limites (figure 1).

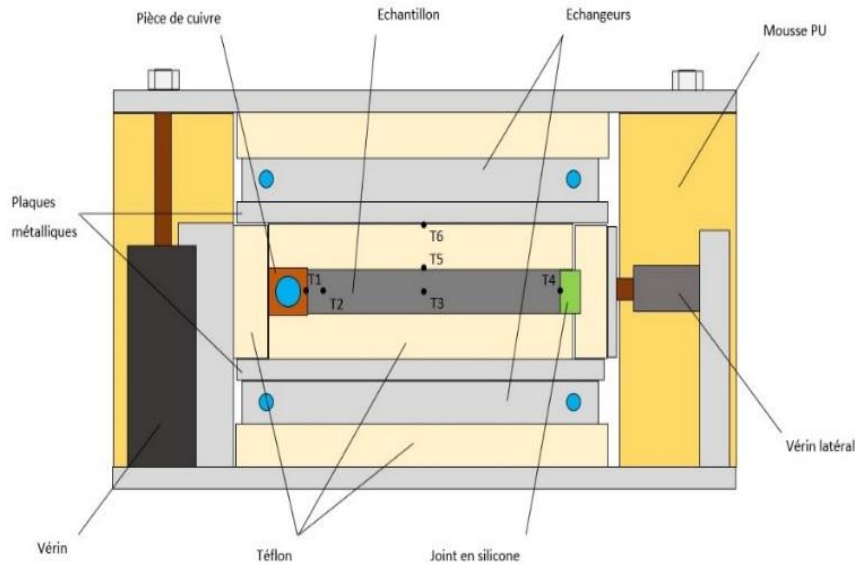


Figure 1 : Schéma en coupe du dispositif expérimental.

Une méthode inverse a été développée sous Matlab pour l'identification des inconnues du système. Cette méthode a été utilisée pour déterminer la conductivité thermique plane à partir des relevés de température expérimentaux, et a été également utilisée pour étudier et déterminer la résistance thermique entre le matériau composite et l'élément chauffant/refroidissant. Nous avons obtenu une valeur de  $19.8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , ce qui est conforme aux résultats trouvés avec d'autres méthodes de mesure [4]. La résistance thermique de contact cuivre/composite est évaluée à  $4,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2.\text{K}.\text{W}^{-1}$

Les paramètres issus de l'identification par méthode inverse ont été utilisés pour simuler le transfert thermique pendant la fusion et la solidification du matériau composite. Des comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques pendant le changement de phase du matériau composite ont été réalisées. Pendant la phase de fusion du matériau composite, le fluide a été fixé à une température de  $85^\circ\text{C}$  à la surface de la pièce en cuivre, et l'ensemble étant à  $50^\circ\text{C}$  à l'état initial (figure 2). Pendant la phase de solidification du matériau composite, la température du fluide caloporteur était de l'ordre de  $45^\circ\text{C}$ , et la température initiale de l'ensemble du matériau était de l'ordre de  $80^\circ\text{C}$  (figure 3).

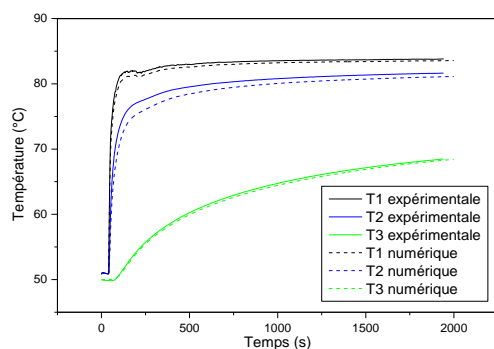


Figure 2 : Comparaison des courbes expérimentales et numériques pendant la fusion du MCP.

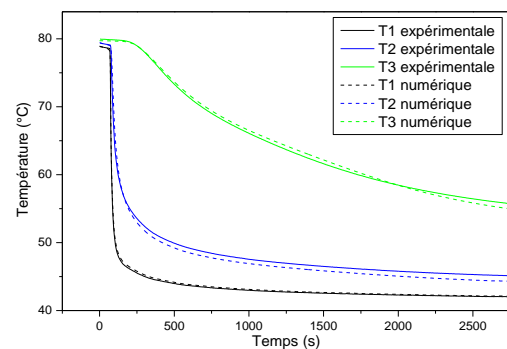


Figure 3 : Comparaison des courbes expérimentales et numériques pendant la solidification du MCP

Les courbes montrent un très bon accord, avec de faibles différences entre expérimental et numérique. Le modèle du transfert thermique entre une plaque de matériau composite en phase de fusion et solidification, utilisant la méthode du Cp apparent, est donc validée avec des conditions aux limites finement maîtrisées. [3].

L'objectif du paragraphe suivant, est de reprendre la même méthode numérique pour étudier le comportement thermique du matériau composite dans un échangeur stockeur multitube, composé de plusieurs plaques, pendant les phases de stockage et déstockage (fusion/solidification). Cependant, compte tenu de la complexité du système envisagé (nombre de plaques important), un modèle numérique 3D serait trop gourmand en ressources. On propose de réaliser un modèle 2D dans le plan par élément finis sous Comsol<sup>®</sup>. Le couplage avec les échanges dans les tubes selon la troisième direction est réalisé sous Matlab<sup>®</sup>.

### III. Etude numérique et expérimentale d'un échangeur stockeur composé de plaques en matériau composite

#### 1. Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental étudié permet la circulation d'un fluide caloporteur dans des conduites en cuivre. Il est équipé d'un thermorégulateur, d'un système de refroidissement, constitué d'un radiateur immergé dans un bain d'eau glacée et d'un module de stockage contenant le MCP (figure 4).

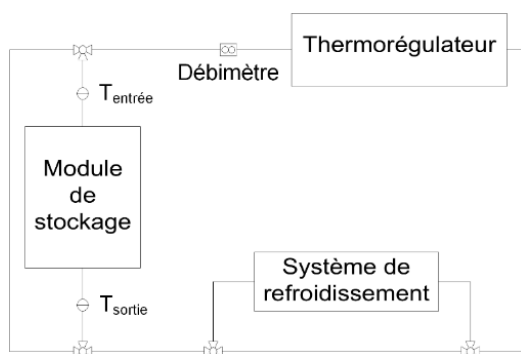


Figure 4 : Schéma du montage expérimental



Figure 5 : Photo de l'échangeur contenant les plaques de matériau composite traversées par cinq tubes.

Le système est muni d'un by-pass qui peut être utilisé pour faire circuler le fluide caloporteur, sans passer par l'échangeur-stockeur. Ceci permet de chauffer le fluide avant de passer à travers l'échangeur contenant le MCP encore froid (stockage d'énergie) ou inversement (restitution d'énergie). Le module de stockage est un échangeur multitube. Ce dernier a été réalisé dans les locaux de l'Icam, dans l'optique d'une intégration à une application industrielle. La géométrie de cinq tubes traversant le matériau composite a été retenue dans la perspective d'obtenir de fortes puissances thermiques en augmentant la surface d'échange avec le fluide caloporteur, d'éviter des pertes de charge trop importantes, ainsi que d'optimiser l'encombrement de l'échangeur.

Le dispositif expérimental (figure 5) est constitué de cinq tubes de cuivre de diamètres 12mm dans lesquels circule un fluide caloporteur, traversant 20 plaques de matériau composite de dimensions 100x100x20mm. Pour cet échangeur, 1,3 kg de paraffine RT70 a été utilisée pour la fabrication des plaques. L'emmanchement des tubes a été réalisé en force, après avoir préalablement percé les plaques de matériau GNE-MCP à l'aide d'une machine-outil à

commande numérique, à un diamètre légèrement inférieur, afin d'assurer un bon contact. Pour anticiper la dilatation thermique du matériau composite, les plaques sont espacées de quelques millimètres dans le sens de l'épaisseur des plaques.

## 2. Instrumentation

Afin d'étudier la distribution de température dans le matériau composite, 10 thermocouples de type K ont été placés dans le stock. Les thermocouples ont été positionnés dans différentes plaques de matériau suivant l'écoulement du fluide (figure 6). Ces thermocouples, en position 2, seront utilisés pour étudier le gradient de température suivant la hauteur de l'échangeur. La dixième plaque a été équipée de thermocouples à différents emplacements, comme le montre la figure 7. Des sondes de PT100 ont été utilisées à l'entrée et la sortie de l'échangeur. Le débit est mesuré par un débitmètre de type Coriolis.

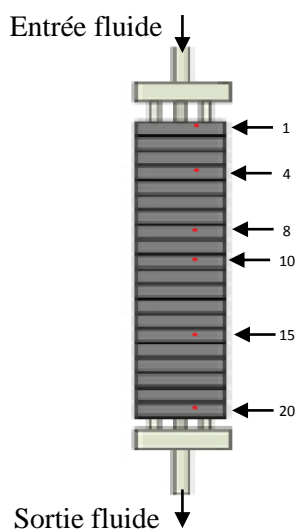


Figure 6 : Position des thermocouples dans les plaques, suivant la hauteur du stockage

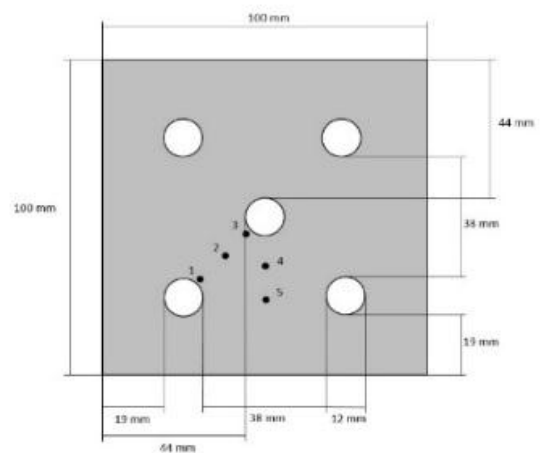


Figure 7 : Schéma d'une plaque de matériau composite traversée par cinq tubes

## 3. Description de la méthode de modélisation numérique

Les résultats expérimentaux issus du démonstrateur ont été utilisés pour valider le modèle numérique. L'échangeur multitube est composé de 20 plaques. Une modélisation 2D pour chaque plaque a été réalisée sous Comsol Multiphysics<sup>®</sup>. Ces plaques de matériaux composites ont été associées entre elles par un couplage et reliées par l'intermédiaire du circuit fluide grâce à une routine développée sous Matlab qui effectue un bilan thermique dans le fluide par tranches correspondant aux plaques.

### 3.1. Modélisation numérique par éléments finis

Le motif élémentaire 2D dans le plan d'une plaque de matériau composite développé sous Comsol est présenté en figure 8. Ce modèle ne représente pas parfaitement la plaque constituée de cinq tubes, cependant en première approche et pour raison de simplicité afin de tester la faisabilité de la simulation 2D éléments finis associé à un couplage avec Matlab, cette configuration a été retenue. On reprend la méthode du « Cp apparent » pour la modélisation du changement de phase du matériau composite. Ce dernier est composé d'une fraction massique de GNE de 25% pour 75% de paraffine RT70 de RUBITHERM<sup>®</sup>.

### 3.2. Conditions à la limite

Le contour de la plaque est supposé adiabatique par raison de symétrie. La condition à la limite au niveau du tube est la température moyenne du fluide caloporteur  $T_{\text{moy}}(k)$  associée au coefficient d'échange convectif équivalent  $h_{\text{eq}}$  (Résistance thermique de la paroi, résistance thermique de contact identifiée en [1], et coefficient d'échange convectif  $h_{\text{fluide}}$  calculé ci-dessous dans une tranche correspondant à une plaque  $k$ ).

Le coefficient d'échange du fluide caloporteur a été calculé à partir du nombre de Nusselt, pour déterminer par la suite le flux de chaleur convectif entre le fluide caloporteur et le matériau composite.

Dans un premier temps, un nombre de Reynolds a été calculé pour caractériser la nature du régime de l'écoulement, par l'équation :

$$Re = \frac{\rho(t) \times V(t) \times D}{\mu(t)}$$

Où,  $\rho$  est la masse volumique du fluide caloporteur ( $\text{kg.m}^{-3}$ ),  $V$  est la vitesse du fluide caloporteur ( $\text{m.s}^{-1}$ ),  $D$  est le diamètre intérieur du tube (m),  $\mu$  est la viscosité dynamique de l'eau ( $\text{Kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ).

Les propriétés thermiques du fluide (eau) ont été calculées en fonction des températures expérimentales à chaque instant.

Un nombre de Reynolds supérieur à 10000 a été déterminé. Le nombre de Nusselt a été ensuite calculé à partir de la corrélation de Colburn dans le cas d'un régime turbulent par l'équation suivante :

$$Nu = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^n$$

Avec  $n = 0,4$  en cas de l'échauffement du fluide et  $n = 0,3$  en refroidissement du fluide [5].

Enfin, le coefficient d'échange du fluide caloporteur a été calculé par l'équation suivante :

$$h(t) = \frac{Nu(t) \times \lambda}{D}$$

Où  $\lambda$  est la conductivité thermique du fluide caloporteur ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ),  $D$  est le diamètre intérieur du tube (m) et  $Nu(t)$  est le nombre de Nusselt.

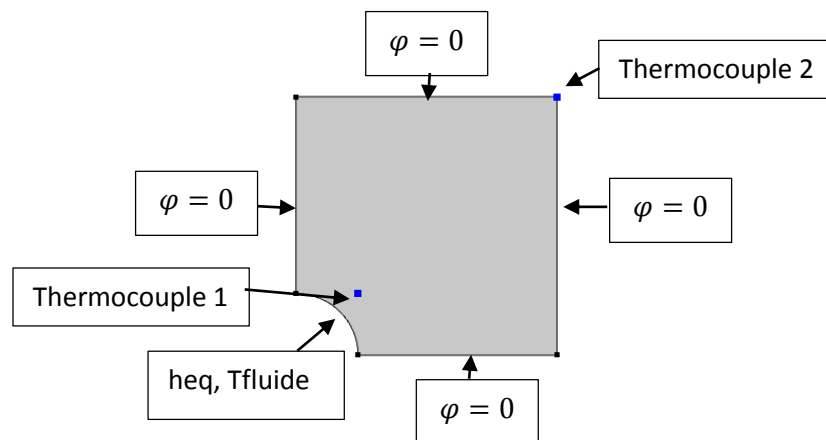


Figure 8 : Modèle 2D dans le plan d'une plaque de matériau composite

### 3.3. Propriétés thermique du matériau composite

L'identification des capacités thermiques massiques solides et liquide du matériau composite a été réalisée par des mesures en DSC (Calorimétrie Différentielle à Balayage en français). La plage de fusion de la paraffine RT70 est comprise entre 66 et 74°C (figure 9). La plage de solidification est comprise entre 58 et 69°C avec deux pics séparés (figure 10). Cette paraffine montre clairement des effets cinétiques qui seront pris en compte dans des versions ultérieures du programme de simulation, nous rappelons que l'on ne veut ici tester que la faisabilité et les limites de la simulation. L'évolution de la capacité thermique massique de la paraffine RT70 en fonction de la température, a été définie par morceaux sous Comsol. Pour cela, une régression polynomiale a été réalisée sous Excel pour chaque intervalle. Une vérification des valeurs de la capacité thermique massique obtenues par la méthode de régression polynomiale a été réalisée en les comparant avec les valeurs obtenues par DSC. La différence d'enthalpie de changement d'état entre la modélisation et l'expérience en phase de fusion est de l'ordre de 4% (figure 9) et en phase de solidification est de l'ordre de 6% (figure 10). Cette différence est due à la marge d'erreur de la méthode de régression polynomiale.

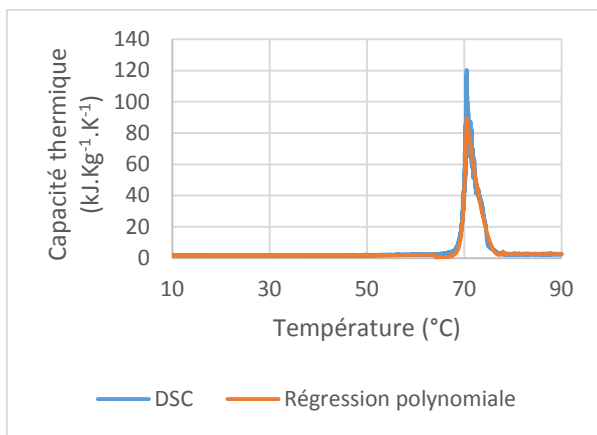


Figure 9 : Capacité thermique massique de la RT70 en fonction de la température (fusion)

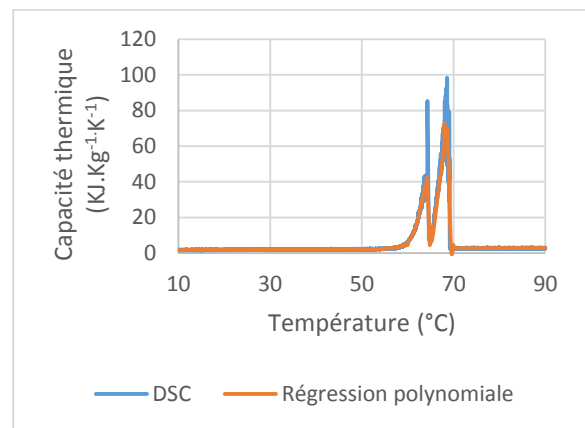


Figure 10 : Capacité thermique massique de la RT70 en fonction de la température (solidification)

La capacité thermique massique du GNE obtenue expérimentalement par la DSC (figure 11), a été introduite dans le modèle Comsol par l'équation de la courbe de tendance.

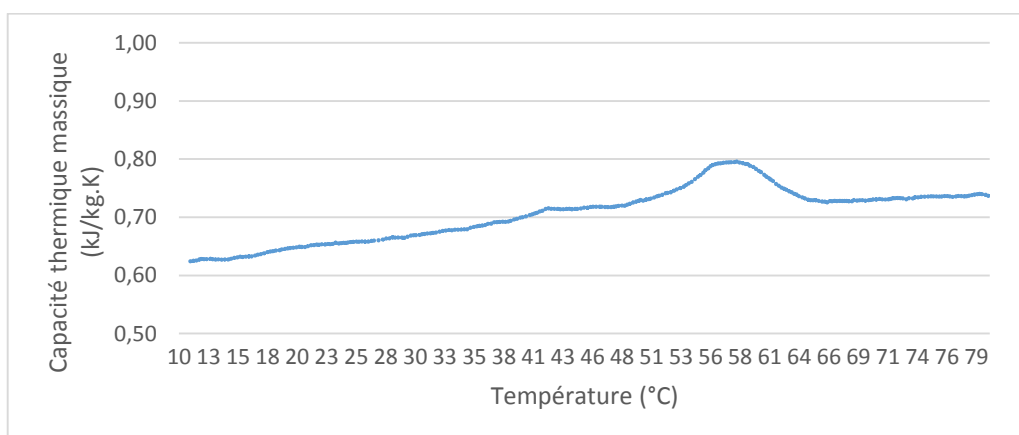
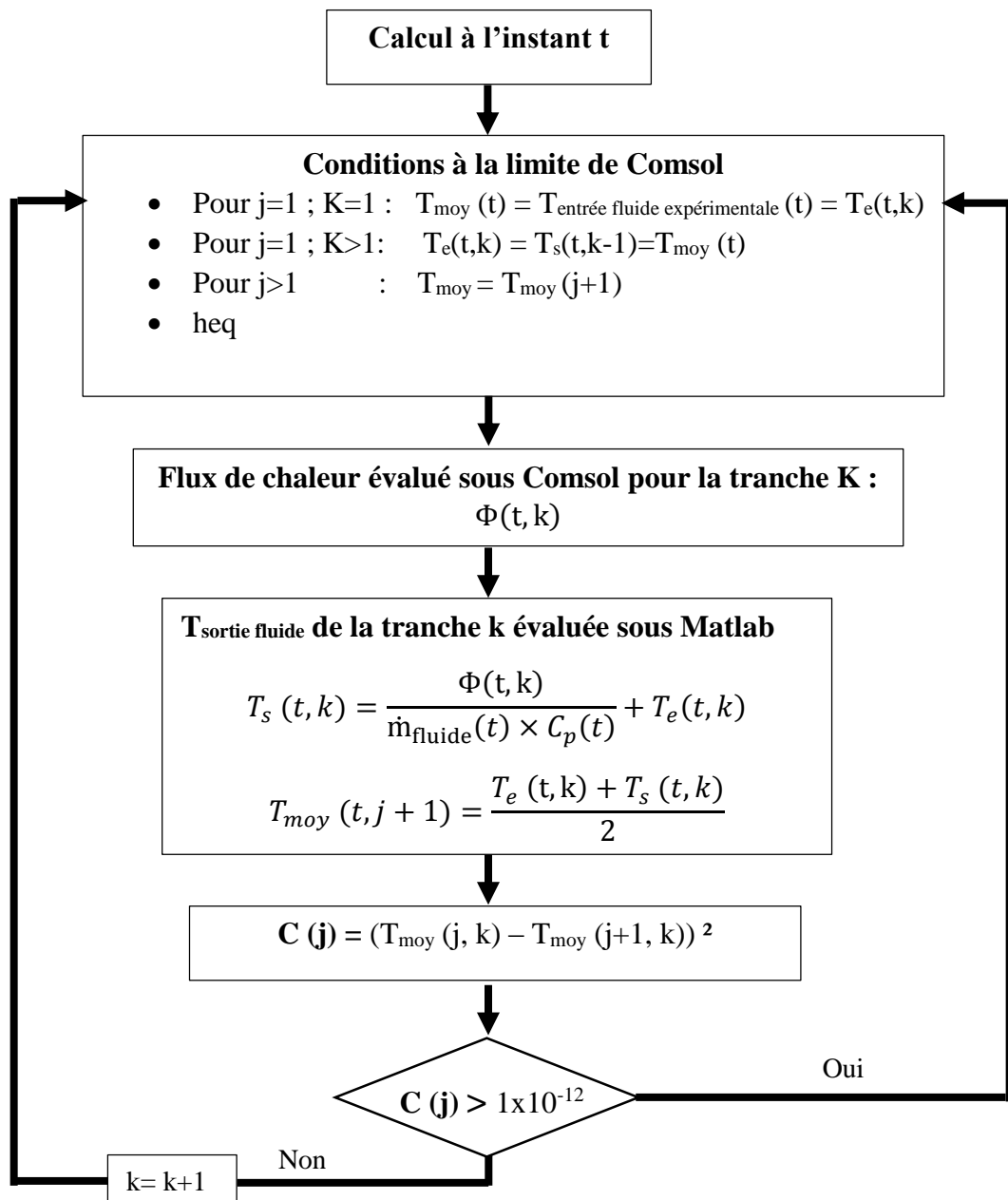


Figure 11 : Capacité thermique massique du graphite expansé en fonction de la température

Les valeurs de conductivité thermique plane et transverse de l'échantillon sélectionnée issues de mesure de plaque chaude gardée et dispositif du paragraphe 2, sont respectivement  $\lambda_{\text{plane}} = 19,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $\lambda_{\text{transverse}} = 6,12 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . L'incertitude du dispositif de la plaque chaude gardée est estimée à 5%. La valeur de la masse volumique du matériau composite est de  $\rho = 878 \text{ Kg.m}^{-3}$  [4].

### 3.4. Méthodologie de calcul

L'algorithme de résolution est décrit dans le schéma suivant. Il illustre le couplage entre la simulation 2D élément fini par Comsol et le lien effectué par la routine sous Matlab.



Où J est le nombre d'itération, k est le nombre des plaques,  $T_{\text{moy}}(t)$  est le champ moyen de température suivant l'épaisseur de la plaque,  $T_e(t)$  est la température entrée du fluide caloporteur,  $T_s(t)$  est la température de sortie du fluide caloporteur,  $h_{\text{eq}}$  coefficient d'échange



équivalent,  $\dot{m}_{\text{fluide}}(t)$  est le débit du fluide caloporteur mesuré [ $\text{Kg.s}^{-1}$ ],  $C_p(t)$  est Capacité thermique massique du fluide caloporteur [ $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{k}^{-1}$ ]. Les propriétés thermiques du fluide caloporteur ont été calculées en fonction des températures expérimentales à chaque instant.

Un critère quadratique a été fixé de la température moyenne du fluide caloporteur sous Matlab, par :  $(T_{\text{moyenne}}(j+1) - T_{\text{moyenne}}(j))^2 > 10^{-12}$ . Ce critère signifie que tant la variation de température moyenne entre deux itérations est supérieure à  $1 \times 10^{-12}$ , le logiciel va continuer à itérer. La convergence a, à chaque fois, été obtenue après quatre itérations.

### **3.5.Limite du modèle numérique**

Une vérification de la conservation d'énergie dans le modèle numérique a été effectuée. Pour cela, Une comparaison entre la variation d'enthalpie entre deux instants (début et fin du stockage), et la chaleur absorbée ou cédée par le fluide caloporteur dans tout le stock a été effectuée. Une différence inférieure à 0.1% entre ces deux valeurs a été relevée.

La méthode du  $C_p$  apparent présente une difficulté lors de la modélisation de la fonction du  $C_p$  dans la plage de température où a lieu le changement de phase. En phase de chauffage du fluide caloporteur, le logiciel n'a pas pu converger, en raison de la présence des deux pics très abrupte de la capacité thermique massique. Ces variations brutales créent des problèmes de convergence lors de la résolution numérique, malgré les pas de temps très petits.

## **4. Comparaison calcul-essais**

### **4.1.Variation de température expérimentale au sein du stock**

L'évolution des températures à l'emplacement du thermocouple 2 placés suivant la hauteur de l'échangeur sont présentées en figures 12 et 13. Pour cet essai, l'échangeur a préalablement été maintenu à une température de 59 °C (sous sa température de fusion), puis un échelon de température de 15K est imposé. On remarque que l'évolution des températures relevées à différentes hauteurs sont très proches, en particulier pendant la phase de chaleur latente, jusqu'à 150 s. Au démarrage, on remarque un comportement particulier avec une grande différence entre les températures entrée et sortie du fluide caloporteur dans l'échangeur stockeur. Ceci peut s'expliquer par la période transitoire d'évacuation d'eau restante dans la conduite suite aux essais réalisés précédemment. Ceci n'est pas pris en compte dans la simulation.

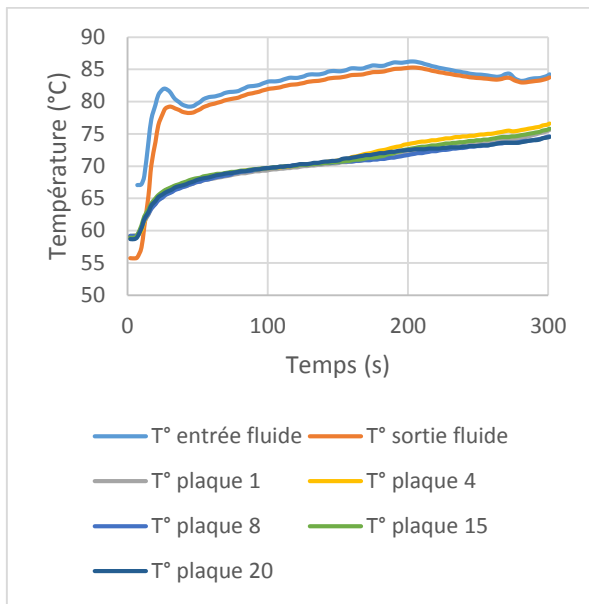


Figure 12 : Evolution des températures suivant la hauteur de l'échangeur en phase de fusion.

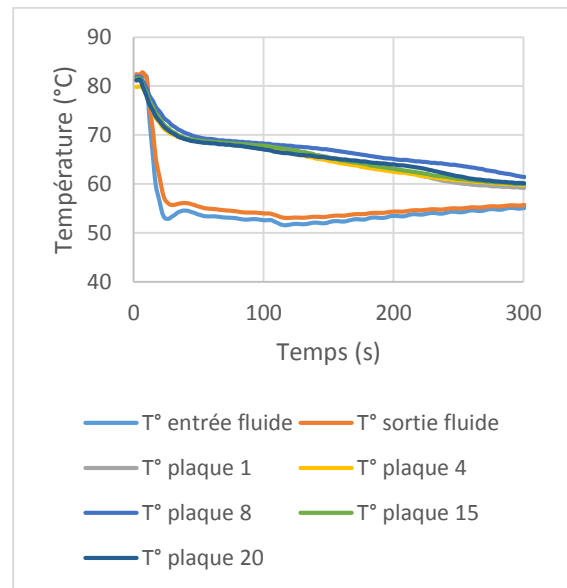


Figure 13 : Evolution des températures suivant la hauteur de l'échangeur en phase de solidification.

Les figures 14 et 15 montrent l'évolution des températures de la dixième plaque, à différentes positions. On observe des différences de température entre les sondes proches des tubes et les sondes éloignées, de l'ordre de 7 K au maximum. La sonde numéro 3 réagit beaucoup plus vite que les autres sondes. Il est probable que cette sonde soit plus proche des tubes que la sonde numéro 1. De plus, il est probable que la qualité du contact peut varier d'un tube à l'autre. Finalement, une durée d'environ quatre minutes est nécessaire pour fondre la totalité du matériau.

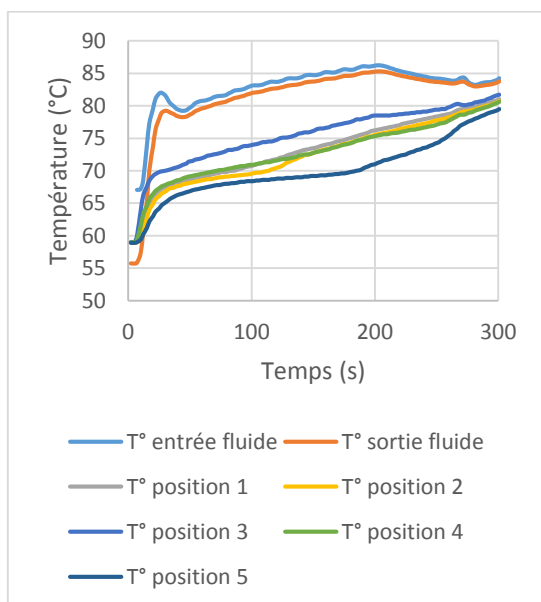


Figure 14 : Evolution des températures de l'échangeur sur la plaque 10, à différentes distances des tubes en phase de fusion.

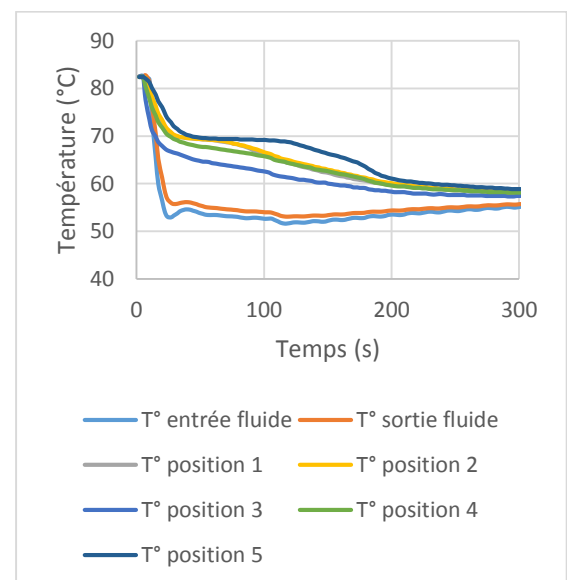


Figure 15 : Evolution des températures de l'échangeur sur la plaque 10, à différentes distances des tubes en phase de solidification

## 4.2. Comparaison entre les puissances thermiques calculé et mesuré

L'évolution de la puissance thermique délivrée par le fluide caloporteur pendant la phase de chauffage et refroidissement du fluide caloporteur est obtenue par la formule suivante :

$$\Phi(t)_{\text{expérimental}} = \dot{m}_{\text{fluide}}(t) \times C_{p\text{fluide}}(t) \times \Delta T_{\text{entrée/sortie}}(t)$$

Où  $\Delta T_{\text{entrée/sortie}}$  est la différence de température du fluide caloporteur entre l'entrée et la sortie du démonstrateur.  $C_{p\text{fluide}}(t)$  et  $\dot{m}_{\text{fluide}}(t)$  sont respectivement la capacité thermique massique et le débit massique du fluide. Les propriétés thermiques du fluide caloporteur (de l'eau), ont été utilisées pour calculer à chaque instant ces paramètres.

Le flux de chaleur convectif du fluide caloporteur traversant le matériau composite a été évalué numériquement sous Comsol par la formule suivante :

$$\Phi(t)_{\text{Numérique}} = (h_{\text{fluide}}(t) + \frac{1}{R_{tc}}) \times (T_{\text{fluide}}(t) - T_{\text{matériau}}(t))$$

Où  $h_{\text{fluide}}$  est le coefficient de convection du fluide caloporteur, calculé par la corrélation de Colburn (paragraphe 3.2).  $R_{tc}$  est la résistance thermique de contact entre le tube en cuivre et le matériau composite  $1.10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{K}^1 \cdot \text{W}^{-1}$ , identifiée en [1].  $T_{\text{fluide}}$  est le champ de température moyen du fluide caloporteur calculé numériquement sous Matlab par une moyenne entre la température entrée et sortie du fluide caloporteur dans une plaque.  $T_{\text{matériau}}$  est la température moyenne de la plaque du matériau composite calculée sous Comsol.

La figure 16, montre une comparaison entre la puissance mesuré expérimentalement et celle mesurée numériquement.

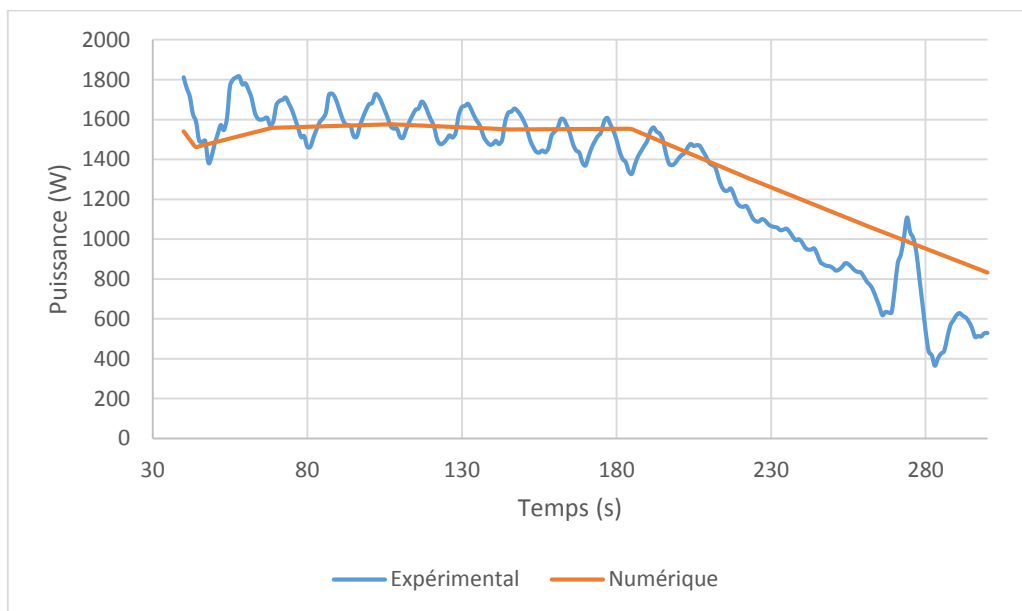


Figure 16 : Evolution de la puissance thermique restituée du stock en refroidissement

Les courbes montrent une allure semblable et donnent des valeurs du même ordre de grandeur. Ces valeurs varient entre 500 et 1800 W dans tout le stock en fonction du temps. Les oscillations de la puissance obtenue expérimentalement sont dues à celles de la différence de température du fluide caloporteur dans le stock.

Dans le modèle numérique la puissance est évaluée par l'évolution de l'enthalpie du matériau qui prend en compte l'ensemble des températures dans celui-ci. Elles ne varient de manière périodique qu'au voisinage de la surface (profondeur de pénétration) et la moyenne sur le volume lisse les variations.

### 4.3. Comparaison entre le coefficient d'échange total.

A partir des résultats de puissance thermique obtenue numériquement et expérimentalement, un coefficient d'échange total entre le fluide caloporteur et le matériau composite a été calculé par l'équation suivante :

$$h_{total} = \frac{\Phi(t)}{S \times (T_{fluide\ caloporteur}(t) - T_{moyenne\ du\ matériau}(t))}$$

Où  $\Phi(t)$  est la puissance thermique,  $S$  est la section d'échange entre le tube et le matériau composite,  $T_{fluide\ caloporteur}$  est la température moyenne du fluide caloporteur dans tout le stock,  $T_{moyenne\ du\ matériau}$  est la température moyenne du matériau composite dans tout le stock. Ces paramètres ont été déterminés expérimentalement et numériquement pour évaluer respectivement le coefficient d'échange total expérimental et numérique.

La figure 17 montre une comparaison entre l'évolution des coefficients d'échange total obtenu numériquement et expérimentalement en fonction du temps.

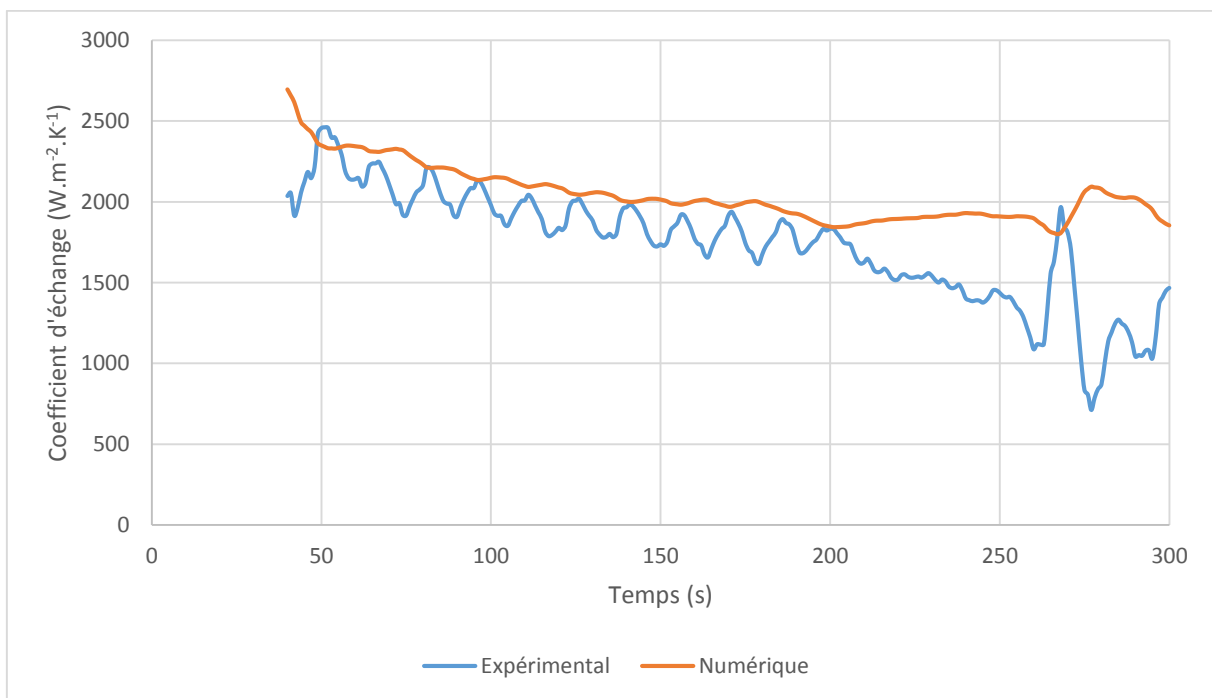


Figure 17 : Evolution du coefficient de convection en fonction du temps en phase de fusion.

Les courbes montrent un bon accord, avec des valeurs proches. Ces valeurs varient de 1000 à 2500 W.m<sup>2</sup>.K<sup>-1</sup>.

#### 4.4. Comparaison des températures dans le stock

Les variations de température du thermocouple 2 dans la première plaque issue des valeurs expérimentales ont été comparées avec l'évolution de la température obtenue par le calcul (figure 18).

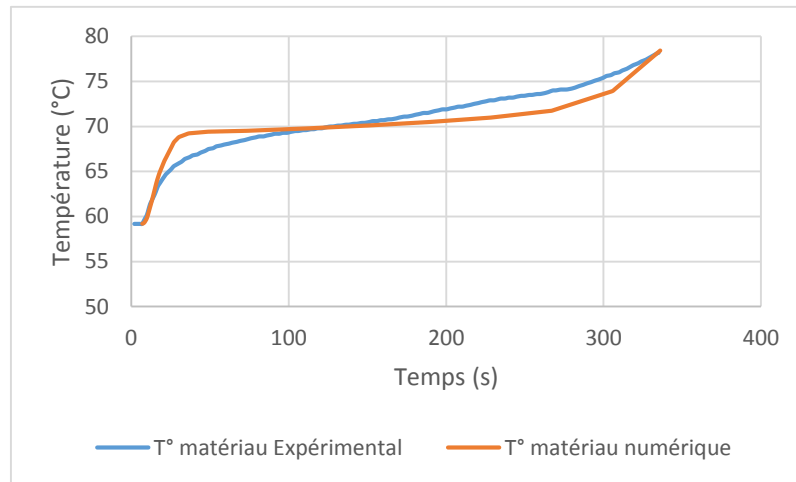


Figure 18 : Evolution de la température du matériau composite

Les courbes montrent un bon accord avec une différence entre les résultats obtenus expérimentalement et numériquement. Cette faible différence peut être due à la modélisation de l'évolution du Cp apparent qui écrête le pic (figure 9) et à l'utilisation de la loi de mélange entre le Cp de la paraffine et du GNE pour modéliser le Cp du composite. En effet, il a été montré que lorsqu'on rajoute du GNE dans de la paraffine, la courbe de Cp apparent de la paraffine s'étale. Ainsi que le palier de température de changement de phase est moins marqué avec la présence du GNE [6].

Une modification de la méthode du Cp apparent en méthode enthalpique sous Comsol est indispensable pour simuler mieux le changement de phase dans le matériau et surtout permettre une convergence du calcul et palier le problème de divergence observé en phase de solidification. Le problème numérique sera plus stable et conservatif, car la valeur de l'enthalpie tient compte du changement de phase sans pour autant présenter d'aussi grandes non linéarités. De plus, la nécessité d'intégrer une cinétique de changement d'état impose d'introduire un terme source dans la formulation enthalpique.

Les figures 19 et 20 montrent la distribution de la température en début et en fin de la phase de fusion du matériau composite de la première plaque. On peut noter que cette distribution de température n'est pas exactement conforme à la réalité du fait du tube central omis dans la simulation.

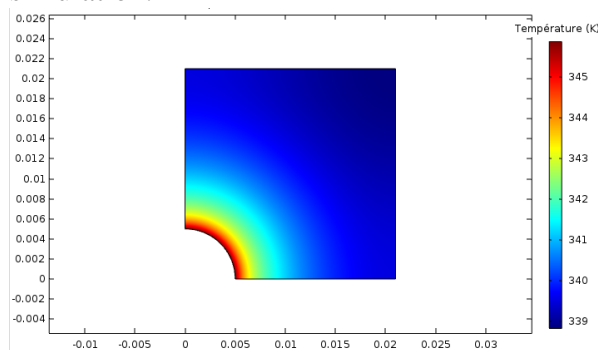


Figure 19 : Evolution de la température dans le matériau composite à t=15s

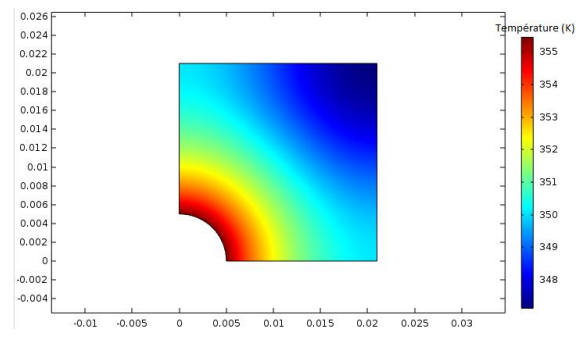


Figure 20 : Evolution de la température dans le matériau composite à t=300s.

## IV. Conclusion

Une modélisation thermique 3D par éléments finis d'une plaque de matériau à changement de phase imprégné dans une structure conductrice de GNE, utilisant la méthode du Cp apparent a été validée. Cette plaque constitue le module élémentaire d'un stock par chaleur latente. Cette même méthode a été à nouveau utilisée sur une configuration constituée d'un empilement de plaques traversé par cinq tubes. Une variante a été apportée en modélisant la plaque en 2D par éléments finis et le couplage dans la troisième dimension étant effectué par un bilan énergétique par tranche réalisé sous Matlab. Les puissances et les coefficients d'échange calculés et mesurés sont très proches, malgré les hypothèses simplificatrices. Par contre, les limites de la méthode de Cp apparent sont apparues dans le cas d'une très forte non linéarité du Cp, notamment pour la RT70 en phase de solidification. Des travaux complémentaires sont en cours en utilisant la méthode enthalpique pour simuler le transfert thermique dans le matériau composite GNE-MCP.

## Références

- [1] Kevin Merlin, Didier Delaunay, Jérôme Soto, Luc Traonvouez, "Heat transfer enhancement in latent heat thermal storage systems: comparative study of different solutions and thermal contact investigation between the exchanger and the PCM," *Applied Energy*, Vol 166, pp.107–116, 2016.
- [2] A. M. Borreguero, M. Luz Sánchez, J. L. Valverde, M. Carmona, and J. F. Rodríguez, "Thermal testing and numerical simulation of gypsum wallboards incorporated with different PCMs content," *Appl. Energy*, vol. 88, pp. 930–937, Mar. 2011.
- [3] Mariam Jadal, Kevin Merlin, Didier Delaunay, Lingai LUO, Jérôme Soto, "Etude d'un dispositif de caractérisation thermique de matériaux composites : application à un matériau à changement de phase dans une structure conductrice", *Compte rendu du Congrès de la Société Française de la Thermique SFT*, Marseille 2017.
- [4] Kevin Merlin, "Caractérisation thermique d'un matériau à changement de phase dans une structure conductrice", *Thèse de doctorat en Energétique, Thermique, Combustion*, Université de Nantes, 2016.
- [5] Dawid Taler, Jan Taler, "Simple heat transfer correlations for turbulent tube flow", *4th Scientific and Technical Conference on Modern Technologies and Energy Systems*, Volume 13, 2017
- [6] Vincent Morisson, "Heat transfer modelling within graphite/salt composites: from the pore scale equations to the energy storage system", *Thèse de doctorat en Mécanique et Ingénierie*, Université Bordeaux 1, 2008.