

# Etude numérique du stockage latent d'énergie thermique dans un échangeur-stockeur innovant pour l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments

Hamid BELLACHE<sup>1</sup>, Jules Voguelin SIMO TALA<sup>1\*</sup>, Daniel BOUGEARD<sup>1</sup>, Zohir YOUNSI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut Mines-Télécom Nord Europe, EI, F-59508 Douai, France

<sup>2</sup> JUNIA-HEI, 13 Rue de Toul, F-59000 Lille, France

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

**Résumé** La présente étude s'intéresse à l'analyse de l'impact de l'intensification des échanges thermiques sur les cinétiques de fusion-solidification d'un MCP. Cette étude montre qu'à iso-surface d'échange, compacité et volume de MCP, l'intensification des échanges thermiques par manipulation passive de l'écoulement du fluide caloporteur permet d'accroître les cinétiques de stockage-déstockage d'énergie thermique de près de 91% par rapport au cas de base. Le concept développé produit une amélioration remarquable du confort thermique estival et hivernal pour une application dans le secteur de l'habitat.

## Nomenclature

$a$	Longueur de l'ailette Delta, $m$	$PEC$	Facteur d'intensification, $\frac{Nu}{Nu_0} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{-\frac{1}{3}}$
$A$	Coefficient de Carman-Kozeny	$Re_d$	Nombre de Reynolds, $\frac{\rho U d}{\mu}$ , -
$b$	Hauteur de l'ailette Delta, $m$	$T$	Température, $K$
$C_p$	Capacité calorifique, $J kg^{-1} K^{-1}$	$U, V$	Vitesse, $ms^{-1}$
$d, D$	Diamètre du tube/calandre, $m$		Symboles grecques :
$e$	Epaisseur, $m$	$\alpha$	Angle d'attaque de l'ailette, $^\circ$
$f$	Facteur de friction, $\frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 \frac{4l}{d}}$ , -	$\beta$	Angle de roulis de l'ailette, $^\circ$
$g$	Accélération de la pesanteur, $ms^{-2}$	$\beta_e$	Coefficient d'expansion isobare, $K^{-1}$
$h$	Coefficient d'échange, $W m^{-2} K^{-1}$	$\rho$	Masse volumique, $kg m^{-3}$
$h_s$	Enthalpie sensible massique, $J kg^{-1}$	$\mu$	Viscosité dynamique, $kg m^{-1} s^{-1}$
$H$	Enthalpie totale massique, $J kg^{-1}$	$\lambda$	Conductivité thermique, $W m^{-1} K^{-1}$
$L$	Enthalpie de fusion, $J kg^{-1}$		Indices et exposants
$l$	Longueur d'un compartiment, $m$	$0/a/l/s$	entrée/air/liquide/solide
$Nu$	Nombre de Nusselt, $\frac{hd}{\lambda}$ , -	$ref/f/mf$	référence/film/moyenne de fusion
$p$	Pression, $Pa$		Solidus/Liquidus de solidification/de fusion

## 1. Introduction

La récupération, le stockage d'énergie thermique et sa revalorisation fait partie des stratégies déployées dans le cadre de la transition énergétique. C'est une méthode qui permet de différer l'utilisation de l'énergie thermique dans les procédés et systèmes en fonctionnement dynamique (chauffage, solaire thermodynamique, sericulture, etc.). Le stockage d'énergie thermique peut se faire sous forme sensible, latente ou mixte. En raison de leur grande densité énergétique par unité de volume, le stockage latent dans des matériaux à changement de phase (MCP) est supérieur au stockage sensible. Il s'effectue généralement dans des modules et unités de stockage mettant en œuvre un fluide caloporteur et un milieu de stockage constitué de MCP. Différentes configurations de module de stockage ont été étudiées dans la littérature, la configuration de type tube aileté et calandre étant la plus analysée [1-4].

Erek et al [1] ont numériquement et expérimentalement étudié la solidification de l'eau dans un module de stockage de type tube à ailettes radiales et calandre horizontale. Une étude paramétrique de l'intensification des échanges thermiques coté MCP a montré que les performances de stockage augmentent avec le rayon des ailettes et diminuent avec l'espacement inter-ailettes. Pu et al. [2] ont numériquement étudié le processus de fusion de la paraffine RT35 dans un module de stockage de type tube à ailettes radiales et calandre. L'étude a montré que l'ajout d'ailettes de géométrie arithmétique conduisait à des meilleures performances de stockage. Yang et al. [3] a également effectué une optimisation de la forme et du nombre d'ailettes dans un module de stockage similaire en utilisant le même MCP. Cette étude a permis de trouver un jeu de paramètres optimaux permettant de maximiser les performances de stockage du module. Récemment, Dekhil et al [4] ont étudié l'effet de l'orientation des ailettes sur l'intensification des échanges thermiques coté MCP dans un échangeur stockeur de type tube et calandre horizontal. L'étude effectuée à iso-compacité, surface d'échange et volume de MCP a mis en évidence les meilleures performances de stockage des ailettes longitudinales par rapport aux ailettes radiales.

L'analyse de la littérature met en évidence une bonne documentation sur l'intensification des transferts thermiques coté calandre (MCP) mais, à notre connaissance, aucune étude ne s'est jusqu'à présent intéressée à l'analyse de l'impact de l'intensification des échanges thermiques dans le fluide caloporteur sur les cinétiques de stockage-déstockage d'énergie thermique dans les unités de stockage de type tube et calandre. La présente étude s'intéresse au développement d'un échangeur-stockeur de chaleur tube et calandre intégrant des MCP et une intensification des échanges thermiques dans le fluide caloporteur. Elle a pour objectif d'analyser l'effet de cette intensification sur la cinétique de fusion-solidification du MCP. La première partie de l'étude consiste à utiliser des générateurs de vortex (VG) pour intensifier les transferts thermiques dans un écoulement stationnaire d'air circulant un tube cylindrique chauffé. La seconde partie de l'étude est consacrée au développement, à partir de la précédente géométrie de tube cylindrique intensifié, d'un échangeur-stockeur tube et calandre.

## 2. Formulation mathématique, domaine de calcul et procédure numérique

### 2.1. Formulation mathématique

L'écoulement du fluide caloporteur est modélisé par les équations de conservation (masse, quantité de mouvement) en régime laminaire. Le fluide caloporteur est de l'air supposé incompressible et visqueux. Les transferts de chaleur sont modélisés par l'équation d'énergie dans le fluide caloporteur, couplée à la diffusion thermique dans la masse du tube fait de cuivre. Les transferts thermiques conductifs dans le tube sont couplés aux transferts de chaleur dans les différents compartiments de la calandre remplie d'un MCP de type paraffinique RT26. Le phénomène de fusion-solidification au sein du MCP est modélisé à travers la formulation enthalpique [5], le phénomène de convection naturelle étant pris en compte. Les équations de conservation, limitées au MCP que l'on considère incompressible et visqueux, s'écrivent, en négligeant l'échauffement visqueux et en régime laminaire, comme suit :

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

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \rho \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho_{ref} \vec{g} \beta (T - T_{ref}) + A \vec{V} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_s) = \nabla \cdot \left( \frac{\lambda}{c_p} \nabla h_s \right) \quad (3)$$

$$H = h_s + \Delta H \quad (4)$$

$$h_s = \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (5)$$

$$\Delta H = f_l L \quad (6)$$

$$f_l = \begin{cases} 0 & ; T < T_{solidus} \\ \frac{T - T_{solidus}}{T_{liquidus} - T_{solidus}} & ; T_{solidus} < T < T_{liquidus} \\ 1 & ; T > T_{liquidus} \end{cases} \quad (7)$$

$$A = -C \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + q} \quad (8)$$

Dans ces équations,  $f_l$  la fraction liquide et  $A$  est le terme de Carman-Kozeny qui permet d'annuler le champ de vitesse dans le MCP solidifié en laissant s'écouler librement la phase liquide. Le paramètre «  $q$  » est une valeur faible utilisée pour éviter toute division par 0 et  $C$  une constante qui est fonction de la morphologie de la zone tampon. La valeur de l'espace entre les dendrites secondaires utilisée dans cette étude correspondant à une valeur de constante  $C = 10^6 kg \cdot m^{-3} s^{-1}$  pour le MCP choisi (RT26) [5]. Les propriétés thermophysiques du RT26 utilisés sont données par:  $T_{liquidus} = 26^\circ C$ ;  $T_{solidus} = 25^\circ C$ ;  $\rho_l = 750 kg \cdot m^{-3}$ ;  $\mu = 0,01974 kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ;  $\lambda_l = \lambda_s = 0,2 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $C_{pl} = C_{ps} = 2000 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $L = 180000 J \cdot kg^{-1}$ ;  $\beta_e = 0,00125 K^{-1}$ . Les propriétés thermophysiques de l'air sont évaluées à la température de film  $T_f = \frac{T_{mf} + T_0}{2}$  où  $T_{mf} = 26^\circ C$  est la température moyenne de fusion du MCP et  $T_0$  la température d'entrée de l'air.

## 2.2. Domaine de calcul et conditions aux limites

### 2.2.1. Domaines de calcul

L'échangeur stockeur est constitué d'un tube central de diamètre intérieur  $d = 20 mm$  et d'épaisseur  $e_t = 1 mm$  dans lequel circule le fluide caloporteur (air). Cinq ailettes radiales faites de cuivre d'épaisseur  $e_{ail} = 0,5 mm$  sont utilisées pour diviser la calandre en quatre compartiments de longueur identique  $l = 75 mm$  et de diamètre  $D = 95 mm$

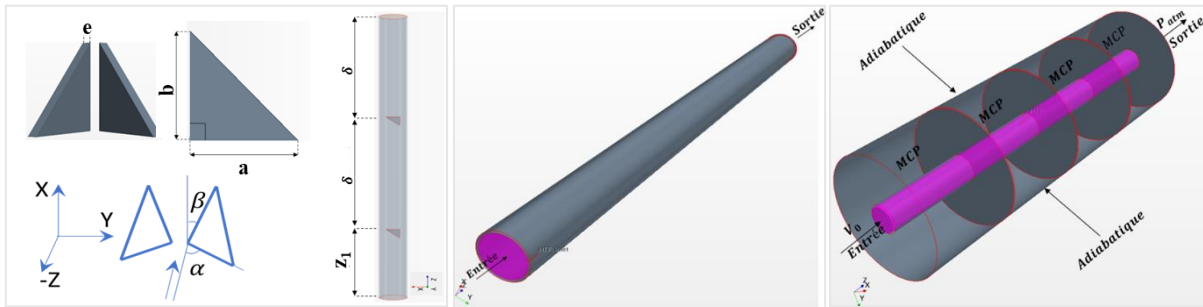


Figure 1 : Domaine d'étude et conditions aux limites

Le but de l'étude étant l'analyse de l'influence de l'intensification des échanges thermiques coté fluide caloporteur sur les cinétiques de fusion-solidification du MCP, le tube central est équipé de deux paires de VG de type ailettes Delta de longueur  $a = 10 mm$  de hauteur  $b = 10 mm$  et avec des orientations angulaires  $\alpha$  (angle d'attaque) et  $\beta$  (angle de roulis) respectivement par rapport à l'axe du tube et par rapport à l'axe portée par la base du VG. Deux rangées de VG sont disposées dans le tube caloporteur respectivement aux positions  $\frac{z_1}{d} = 3,6$ ; et  $\frac{z_2}{d} = 9,6$  par rapport à l'entrée du tube ( $\frac{\delta}{d} = 6$ ). Compte tenu du fait que le phénomène de fusion est relativement lent et que le MCP choisi change d'état dans une plage de température relativement étroite, le problème global a été simplifié en effectuant une optimisation des performances thermoaérauliques du fluide caloporteur seul en régime stationnaire puis en équipant la géométrie issue de l'optimisation d'une calandre compartimentée pour effectuer les simulations transitoires de l'étude des cinétiques de fusion-solidification du MCP.

### 2.2.2. Conditions aux limites

- Les conditions aux limites utilisées pour l'optimisation des performances thermoaérauliques du fluide caloporteur en régime stationnaire sont illustrées sur la figure 1 ci-dessus. En entrée, un profil de vitesse de Poiseuille correspondant à un nombre de Reynolds  $Re_d = 1500$  et une température d'entrée  $T_0 = 15^\circ C$ , en sortie une condition de pression relative nulle, sur la paroi extérieure une condition de température correspondant à la température de transition du MCP et à l'interface entre le tube et le fluide caloporteur un couplage conducto-convectif. Toutes les parois des ailettes Delta sont adiabatiques.

- Les conditions aux limites utilisées pour la simulation des processus de fusion-solidification en régime transitoire sont illustrées sur la figure 1. En entrée, un profil de vitesse de Poiseuille ( $Re_d = 1500$ ) et température  $T_0 = 37^\circ C$  en fusion et  $T_0 = 13^\circ C$  en solidification et en sortie une condition de pression relative nulle sont considérées. Aux interfaces tube-fluide caloporteur, tube-MCP et ailettes-

MCP, un couplage conducto-convectif est considéré. La paroi extérieure de la calandre, les parois externes des ailettes et les parois des ailettes Delta sont considérées adiabatiques.

### 2.2.3. Conditions initiales

En régime transitoire, les conditions initiales appliquées sont les suivantes : Pendant la fusion, à l'instant initial  $t_0=0$  s, tout l'échangeur stockeur est à une température uniforme  $T_i(x, y, z, 0) = 24^\circ\text{C}$ . Pendant la solidification, tout l'échangeur stockeur est à une température uniforme  $T_i(x, y, z, 0) = 27^\circ\text{C}$ .

## 3. Procédure numérique

Le code commercial STAR-CCM + V15.04 [5] a été utilisé pour résoudre les équations de conservation ci-dessus basées sur une méthode de discrétisation en volumes finis. Les équations de conservation ont été résolues séquentiellement à l'aide du solveur algébrique AMG et de l'algorithme SIMPLE pour le couplage pression-vitesse. Une discrétisation du second ordre a été choisie pour les termes convectifs des équations de quantité de mouvement et d'énergie ainsi que pour la discrétisation temporelle. Afin de valider la capacité du code CFD à modéliser le changement de phase, une simulation numérique préliminaire du processus de fusion de l'étain dans une cavité carrée chauffée par le côté a été réalisée et comparée au benchmark bien connu de Hannoun et al. [6]. La comparaison de l'évolution du front de fusion et de la fraction liquide a montré une très bonne concordance avec un écart maximum de 0,86 % entre les deux études. Aussi, une étude de sensibilité au maillage et au pas de temps a été réalisée pendant le processus de solidification. Cette étude a conduit à l'utilisation d'un maillage optimal ayant 1,32 millions de cellules hexaédriques. Enfin, la précision des résultats étant intimement liée au pas de temps choisi pour les calculs instationnaires, une étude de sensibilité au pas de temps a été réalisée en utilisant le maillage optimal ci-dessus. Quatre simulations ont été réalisées avec les pas de temps respectifs  $\Delta t = 1\text{s}; 0,5\text{s}; 0,2\text{s}$  et  $0,1\text{s}$ . En analysant les évolutions des flux thermiques et fraction liquide, il a été décidé d'utiliser un pas de temps adaptatif  $\Delta t = 0,05\text{s}$  pour  $0\text{s} \leq t < 1\text{s}$ ,  $\Delta t = 0,1\text{s}$  pour  $1\text{s} \leq t < 2\text{s}$ ,  $\Delta t = 0,2\text{s}$  pour  $2\text{s} \leq t < 6\text{s}$  et  $\Delta t = 0,5\text{s}$  pour  $t > 6\text{s}$ . Cette stratégie permet de bien capter les gradients initiaux avec un bon compromis entre coût numérique et précision de calcul.

## 4. Résultats

Dans cette section, les résultats des différentes simulations sont présentés et discutés. Comme évoqué plus haut, la première partie de ces résultats se focalisera sur l'intensification des échanges thermiques dans un écoulement de canal circulaire par manipulation passive de l'écoulement via l'insertion de deux paires de VG de type ailettes Delta. Une étude d'optimisation des performances thermoaérauliques de l'écoulement d'air sera effectuée. La géométrie optimale obtenue sera utilisée par la suite pour développer en régime transitoire l'échangeur-stockeur intégrant un MCP de type paraffinique RT26 dans une calandre compartimentée.

### 4.1. Etude stationnaire : Optimisation des performances thermoaérauliques d'un écoulement dans un canal circulaire

Les résultats de l'étude d'optimisation sont présentés dans cette partie sous forme globale en analysant le facteur de friction, de Colburn, et le facteur d'intensification  $PEC$ , puis sous forme locale en analysant les mécanismes d'intensification dans la géométrie optimale. Les paramètres variables dans cette optimisation sont l'angle d'attaque  $\alpha$  et de roulis  $\beta$  des perturbateurs.

#### 4.1.1. Analyse globale

Le facteur d'intensification des transferts thermiques  $PEC$  est construit en rapportant le Nombre de Nusselt et le facteur de friction de l'écoulement dans le tube muni de VG normalisé par ceux du tube lisse. La figure 2 présente l'évolution du facteur de friction  $\frac{f}{f_0}$  et du nombre de Nusselt  $\frac{Nu}{Nu_0}$  du tube intensifié normalisé par ceux du tube lisse ainsi que celle du  $PEC$  en fonction de l'angle d'attaque et de roulis dans le plan factoriel complet d'optimisation  $[\alpha, \beta] = [0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ] \times [0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ]$ . L'analyse de cette figure montre que le nombre de Nusselt et le facteur de friction normalisés ont des évolutions en fonction de l'angle d'attaque délimitées par deux courbes

enveloppes correspondant aux valeurs extrêmes d'angle de roulis. Les plus petites valeurs d'angle de roulis produisent les plus grandes valeurs de facteurs de friction normalisée comprises entre 1,8 soit 80% et 4,6 soit 360% d'augmentation des pertes de charge par rapport au tube lisse (figure2a). Corrélativement, ceci correspond aux plus fortes valeurs de Nombre de Nusselt normalisée comprises entre 1,28 soit 28% et 1,85 soit 85% d'augmentation du coefficient d'échange (figure2b). Le contraire est observé aux plus fortes valeurs d'angle de roulis. Entre ces deux courbes enveloppes, des comportements intermédiaires sont observés.

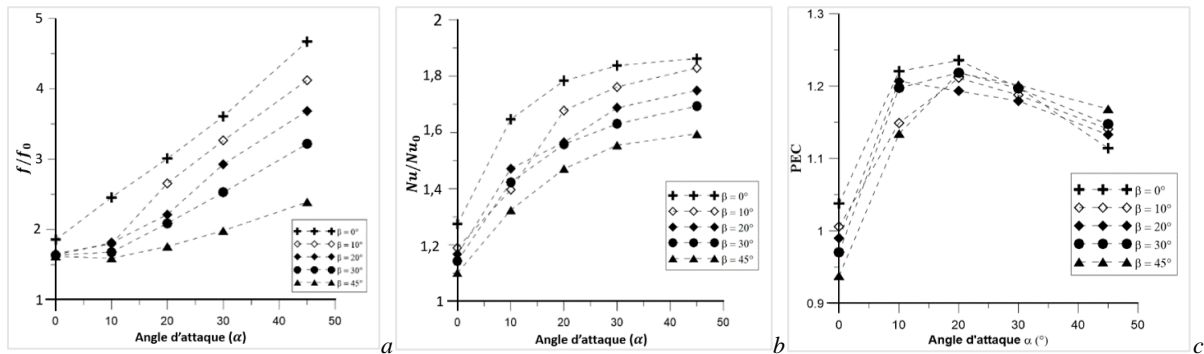


Figure 2 : Evolution du facteur de friction (a), du nombre de Nusselt (b) et du facteur d'intensification (c) en fonction de l'angle d'attaque et de roulis

L'analyse du facteur d'intensification des échanges montre qu'à angle de roulis fixé, l'intensification augmente des faibles valeurs d'angle d'attaque, passe par un maximum et décroît aux fortes valeurs. Ceci est lié au fait qu'au-delà d'un seuil d'angle d'attaque, les tourbillons générés par les VG perdent en intensité pour une trainée de forme de ces VG qui continue d'augmenter. On peut voir clairement que la courbe correspondant à l'angle de roulis  $\beta = 0^\circ$  (VG vertical) produit la plus forte valeur de facteur d'intensification de 1,24 à un angle d'attaque optimal de  $\alpha = 20^\circ$ . Par conséquent, les paramètres optimaux définissant le tube intensifié sont :  $\alpha = 20^\circ$  et  $\beta = 0^\circ$

#### 4.1.2. Analyse locale

Afin d'analyser les mécanismes d'intensification des échanges thermiques liés aux VG, les champs d'hélicité superposés aux lignes de courant et les champs de température sont représentés sur la figure 3 à l'aval de la première paire de VG dans les plans transversaux successifs  $\frac{z}{d} = 3,6$ ; 4,6 et 5,6. Ces champs sont représentés pour la géométrie optimale avec VG orientés à  $\alpha = 20^\circ$  et  $\beta = 0^\circ$ .

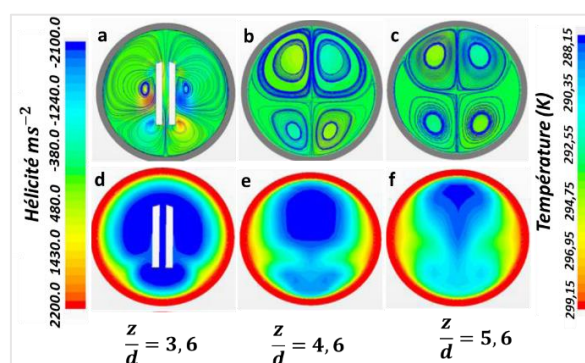


Figure 3 : Structure de l'écoulement, champs d'hélicité (a,b,c) et de température (d,e,f) entre la géométrie à PEC maximal à l'aval de la première paire de VG

L'analyse de cette figure montre que sur le premier plan  $\frac{z}{d} = 3,6$  (bord de fuite de la première paire de VG) l'intensité de l'hélicité générée est la plus élevée et diminue progressivement à travers les deux autres plans en aval  $\frac{z}{d} = 4,6$  et  $5,6$  ce qui traduit la présence de vortex puissants qui se forment et se dissipent au fur et à mesure de leur advection le long du tube. L'analyse des lignes de courant permet de visualiser quatre vortex générés d'abord au centre du canal juste derrière la paire de VG qui se dirigent par la suite vers les parois. La formation, l'évolution vers les parois de ces vortex permet d'écraser la

couche limite thermique que l'on observe sur les cartographies de température ce qui conduit à un meilleur brassage de l'écoulement, donc un meilleur échange thermique avec les parois.

## 4.2. Etude transitoire : Développement d'un échangeur stockeur intensifié et optimisé

Les résultats des simulations transitoires des processus de fusion-solidification du MCP dans l'échangeur stockeur à tube lisse et à tube intensifié issue de la précédente étude d'optimisation sont présentés dans cette section. Une première partie de l'analyse s'effectue au niveau local et se focalise sur l'impact de l'intensification des échanges convectifs dans le tube caloporteur sur les cinétiques de fusion-solidification du MCP puis, une deuxième partie se focalise sur l'analyse globale des performances de stockage-déstockage et l'impact sur la température de sortie du fluide caloporteur.

### 4.2.1. Analyse qualitative locale

Pendant le processus de solidification du MCP (charge), le fluide caloporteur entre dans le domaine d'étude avec une température de 13°C, tout l'échangeur stockeur étant à une température initiale de 27°C. La calandre contient un MCP en phase liquide ( $T_{\text{liquidus}}=26^\circ\text{C}$ ). Le gradient thermique imposé au sein de l'échangeur (froid) par l'écoulement du fluide caloporteur (chaud) génère un phénomène de convection naturelle. Afin d'étudier le développement de cette convection naturelle pendant le processus de solidification, les champs du module de vitesse pour l'échangeur stockeur intensifié et celui à tube lisse, sont présentés pour les instants  $t = 100, 360, 720, 1440, 2880, 4680$  et  $6840$  s sur la figure 4. On observe que pour les deux échangeurs, le module de vitesse du MCP est maximal aux premiers instants, puis au fil du temps, cette vitesse diminue jusqu'à s'annuler ( $t=4680$  s).

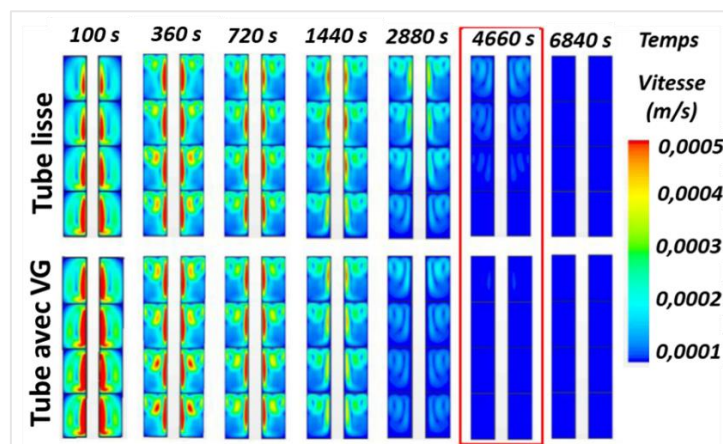


Figure 4 : Cartographie de module de vitesse mettant en évidence le développement de la convection naturelle dans le MCP pendant la solidification pour la configuration à tube lisse et munie VG

Ceci est lié à la diminution des gradients de températures dans le fluide au fur et à mesure de la solidification du MCP, ce qui affaiblit progressivement le mouvement de convection naturelle. On observe également qu'à chaque instant, le maximum de vitesse dans les compartiments analogues des deux échangeurs est clairement plus élevé dans la configuration intensifiée que dans celui à tube lisse. Par conséquent, le transfert convectif dans l'échangeur à tube muni de VG est plus intense que dans celui à tube lisse. Ceci n'est rien d'autre que l'effet notoire de l'intensification des échanges thermiques dans le tube caloporteur muni de VG qui permet d'accroître le coefficient d'échange et donc le transfert thermique par rapport au tube lisse.

Afin de confirmer cet effet positif de l'intensification des transferts thermiques sur l'accroissement du coefficient d'échange, la figure 5 présente la distribution locale du coefficient d'échange sur le tube lisse et le tube muni de VG ainsi que la cartographie de la fraction liquide dans un plan longitudinal à l'instant  $t=11880$  s. On voit clairement que le tube muni de VG présente des zones de forte augmentation du coefficient d'échange aux endroits où sont positionnés les VG contrairement au tube lisse. L'analyse du processus de solidification montre qualitativement la présence à cet instant dans les compartiments analogues des deux échangeurs d'une couche de MCP solidifiée nettement plus épaisse dans la configuration d'échangeur intensifié que dans celle à tube lisse. Un constat similaire a été observé lors de la fusion pour ce qui concerne la fraction solide  $f_s = 1 - f_l$ .



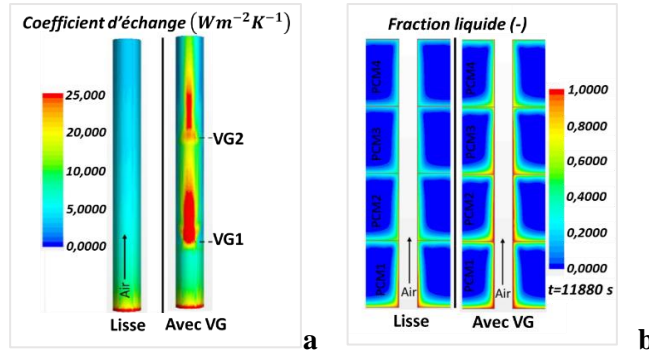


Figure 5 : Cartographie de coefficient d'échange (a) de fraction liquide (b) entre la géométrie à tube lisse et celle munie de VG

#### 4.2.2. Analyse quantitative globale

Afin d'effectuer une analyse quantitative globale des performances de l'échangeur-stockeur, les figures 6a et b ci-dessous représentent l'évolution de la fraction liquide moyenne, respectivement lors de la fusion et lors de la solidification, pour chaque compartiment et pour l'ensemble. Les simulations ont été effectuées seulement sur 12000 s compte tenu du caractère chronophage des processus de fusion-solidification. On peut observer sur la figure 6a que la fraction liquide totale de l'échangeur-stockeur à VG atteint 10,5 % à  $t=12000$  s alors que celle de l'échangeur-stockeur à tube lisse n'est qu'à 5,5 % à cet instant. Un constat similaire peut être effectué lors de la solidification pour ce qui concerne la fraction solide  $f_s = 1 - f_l$  (figure 6b). On en déduit que l'insertion des VG dans le tube permet d'accélérer les processus de fusion et de solidification de près de 91% par rapport au tube lisse.

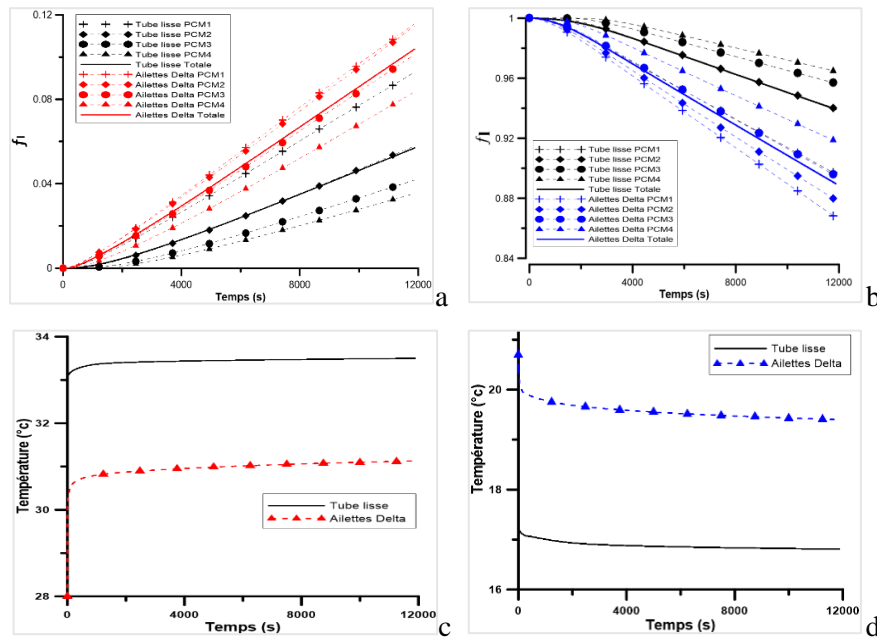


Figure 6 : Profil temporel de fraction liquide pendant la fusion (a), la solidification (b) et température de sortie du fluide caloporteur pendant la fusion (c) et la solidification (c)

Dans la géométrie à tube lisse, on peut constater que le compartiment PCM1 qui est situé au niveau de l'entrée dispose de la fraction liquide la plus élevée (9 %) par rapports aux autres (figure 6a). Ceci est directement liée au coefficient d'échange local qui est élevé dans la zone d'entrée du tube (figure 5a), en raison de la présence d'une couche limite thermique non développée dans cette zone. Plus on s'éloigne de l'entrée du tube, plus la fraction liquide des compartiments diminue, le compartiment PCM4 disposant de la plus faible valeur de fraction liquide (3,5%). Par contre, pour l'échangeur stockeur à tube muni de VG, on remarque que la fraction liquide dans les compartiments PCM1 et PCM2 sont quasi-égaux (11,5%) à  $t=12000$  s (figure 6a). Ceci est directement corrélé à l'effet du VG positionné à  $\frac{z_1}{d} =$

3,6 près de l'entrée qui permet de brasser le fluide caloporteur augmentant ainsi les échanges thermiques et la fraction liquide. Cet effet est également observable au niveau du troisième compartiment PCM3. Une analyse similaire pendant la solidification permet d'aboutir aux mêmes conclusions pendant la solidification (figure 6b). On montre ainsi l'effet notoire de l'intensification au niveau du fluide caloporteur sur la cinétique de fusion-solidification du MCP. Il est important de rappeler que cet échangeur-stockeur est développé pour une application dans l'habitat et sert à préchauffer un air froid pendant l'hiver ou à écrêter les pics de canicule pendant l'été. Afin d'analyser le potentiel de cet échangeur pour une telle application, les figures 6c et d représentent les profils de la température de sortie du fluide caloporteur (air) pour chaque configuration dans le cas de la fusion et de la solidification. Sur la figure 6c, on peut remarquer que l'échangeur-stockeur avec VG permet de refroidir le fluide caloporteur de façon plus importante que dans la configuration à tube lisse. La température du fluide caloporteur pour la configuration intensifiée est réduite de 6°C par rapport à l'entrée (qui est à 37°C) alors que pour la configuration à tube lisse, cette réduction n'est que de 3,5 °C ce qui traduit un meilleur écrêtement des pics de température caniculaires pour la géométrie intensifiée. On aboutit à la même conclusion dans le cas de la solidification (figure 6d). En effet, on observe clairement que la température de sortie du fluide caloporteur pour la configuration intensifiée augmente de 6,5 °C par rapport à l'entrée (à 13°C) alors que cette augmentation n'est que de 3°C pour la géométrie à tube lisse ce qui traduit un meilleur préchauffage de l'air pendant la période hivernale.

## 5. Conclusions

La présente étude avait pour objectif d'analyser l'impact de l'intensification des échanges thermiques coté fluide caloporteur sur les cinétiques de fusion-solidification d'un MCP dans le but de développer un échangeur-stockeur de chaleur de type tube et calandre pour une application à l'amélioration du confort thermique des bâtiments. Les principaux résultats issus de cette étude sont les suivants :

- Les ailettes Delta à angle de roulis nul produisent en canal cylindrique des performances thermoaérodynamiques maximales pour un angle d'attaque modéré.
- A iso-surface d'échange, compacité et volume de MCP, l'intensification des échanges thermiques par l'insertion de paires d'ailettes Delta dans le tube caloporteur permet d'accroître la cinétique de stockage-déstockage d'énergie thermique de près de 91% par rapport à un tube lisse.
- L'échangeur-stockeur intensifié a une incidence remarquable sur l'amélioration du confort thermique en préchauffant l'air frais hivernal et en écrêtement les pics de température caniculaires.

Des travaux complémentaires sont en cours afin de caractériser les performances de l'échangeur-stockeur pour plusieurs MCP ayant une température de changement de phase dans la plage du confort thermique et valider les résultats sur une installation expérimentale.

## Références

- [1] A. Erek, Z. Ilken, M. Ali Acar, Experimental and numerical investigation of thermal energy storage with a finned tube, *International journal of energy research*, volume 29, 2005, Pages 283-301.
- [2] L. Pu, S. Zhang, L. Xu, Y. Li, Thermal performance optimization and evaluation of a radial finned shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit, *App. Therm. Eng.*, Vol. 166, 2020, 114753.
- [3] X. Yang, Z. Lu, Q. Bai, Q. Zhang, L. Jin, J. Yan, Thermal performance of a shell-and-tube latent heat thermal energy storage unit: Role of annular fins, *App. Energy*, Vol. 202, 2017, pp. 558-570.
- [4] M.A. Dekhil, J.V. 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, *App. Therm. Eng.*, Vol. 192, 2021, 116866.
- [5] CD-Adapco. Star CCM+ v15.04 user guide. User guide, 2020.
- [6] N. Hannoun, V. Alexiades, T.Z. Mai, A reference solution for phase change with convection, *International journal for numerical methods in fluids*, Volume 48, 2005, Pages 1283-1308.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée avec le soutien financier de l'Institut Mines Télécom Nord Europe (IMT Nord Europe) à qui nous adressons nos sincères remerciements.