



Etude numérique d'un MCP entouré par un liquide

Haythem SHILI^{1,3}, Kamel FAHEM, Souad HARMAND², Sadok BEN JABRALLAH^{1,3}

¹ Laboratoire d'énergétique et des Transferts Thermiques et massiques de Tunis (LETTM)- Faculté des sciences de Tunis, 1060 Tunisie

² Laboratoire d'automatique de mécanique et d'informatique industrielles et humaines- université de valenciennes et du Cambrésis (UVHC), BP 311, 59301 Valenciennes, France

³ Université de Carthage, Faculté des sciences de Bizerte 7021 Jarzouna- TUNISIE

shilihaythem@gmail.com

fahemka@yahoo.fr

souad.harmand@univ-valenciennes.fr

sbenjabrallah@gmail.com

Résumé : La protection thermique des plaques électroniques des systèmes embarqués pose de plus en plus de problèmes dus aux contraintes d'encombrement et de consommation d'énergie. L'utilisation des matériaux à changement de phase présentent, grâce à leur grande chaleur latente, une solution de plus en plus étudiée et utilisée. Dans la pratique, et sous l'effet des cycles répétitifs de fusion- solidification, l'air s'infiltré souvent entre le MCP et la plaque chaude induisant ainsi un problème de résistance de contact qui réduit les performances du système de refroidissement. Dans ce travail, nous proposons une simulation numérique d'une nouvelle conception qui consiste à confiner le MCP dans une cellule remplie d'eau. Cette solution permettra d'améliorer les transferts thermiques via l'augmentation de la surface d'échange et d'empêcher l'infiltration de l'air.

Mots clés : Matériau à changement de phase, convection naturelle, modélisation, conduction, protection thermique.

1. Introduction

Afin de pallier aux inconvénients de l'utilisation accrue des appareils électroniques, plusieurs travaux ont été faits dans le but de les améliorer. L'aspect thermique est l'un des problèmes les plus importants à résoudre pour améliorer la conception du système. La fiabilité d'un composant électronique est définie par sa capacité à satisfaire les besoins requis lors de sa fabrication. Les investigations montrent que 55% des pannes dans le domaine de l'électronique sont dues à des problèmes de nature thermique [1]. Sans gestion thermique appropriée, la génération de chaleur et l'échauffement peuvent mener à la détérioration des composants électroniques. Pour les appareils portatifs tels que les téléphones portables, les appareils photo numériques, les tablettes, les consoles de jeu électronique, les cartes graphiques etc. l'espace physique disponible pour la gestion de chaleur est réduit et l'utilisation des moyens de refroidissement tel que les ventilateurs n'est pas approprié. Pour cela plusieurs chercheurs ont proposé des études qui ont pour but le refroidissement des composants électroniques basées sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) comme pour les ordinateurs [2,3], et les appareils électroniques portatifs [4].

Les MCP ont été choisis pour un tel refroidissement parce qu'ils présentent une grande chaleur latente, une chaleur spécifique élevée, une température de fusion contrôlable et une petite variation de volume pendant le changement de phase (Z.Younsi [5] a mis en évidence dans sa thèse les intérêts du MCP et à étudier leurs propriétés thermo-physiques caractéristiques des états liquide et solide ainsi que lors du changement de phase. Les MCP peuvent absorber une grande quantité de chaleur durant la phase de fusion ce qui représente une alternative importante pour dissiper l'énergie émanant des composants électroniques.

La quantité de chaleur dissipée lorsqu'on utilise un MCP est généralement supérieure à celle évacuée lors de l'utilisation de l'air ambiant. Par ailleurs les MCP sont particulièrement bien adaptés à l'utilisation cyclique des équipements électroniques puisqu'ils peuvent céder leur chaleur (en se solidifiant) pendant la période d'inactivité.

Kandasamy et al [6] et Wang et al [7] ont étudié numériquement et expérimentalement la gestion thermique des composants électroniques dans différentes orientations dans le cas d'un cycle de changement d'état (fusion + solidification). Ils ont remarqué que le choix de l'orientation pour de telles applications peut être ignoré parce que l'effet est insignifiant et qu'il faut plutôt considérer comme critère de conception le niveau de puissance par rapport à la résistance thermique du MCP.

En pratique, les cellules utilisées ne sont pas remplies à 100% avec le MCP. Un volume libre est réservé pour la dilatation thermique du MCP.

En fonction de l'utilisation et surtout dans le cas de l'électronique embarqué, une partie du volume d'air se trouvant en haut de la cellule peut s'infiltrer entre la plaque chaude et le MCP et forme ainsi une résistance de contact qui freine le transfert thermique. Ce phénomène est plus visible si on utilise des plaques à ailettes.

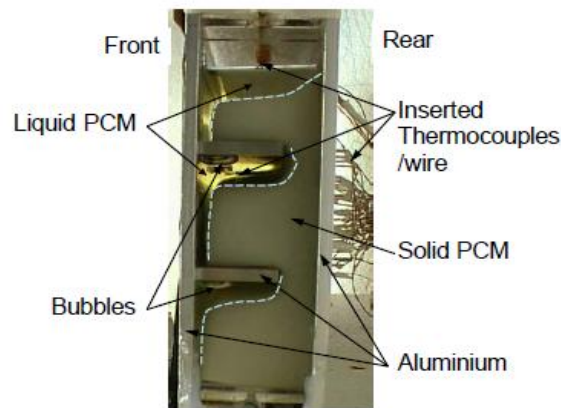


Figure 1 : Formation des bulles d'air lors de la fusion [8]

En plus, la présence des poches d'air entre les plaques chaudes et le MCP freine le transfert thermique et peut provoquer des petites zones de surchauffe. Cette situation fait dégrader les performances de la cellule (résistance de contact) et réduit la durée de vie du MCP.

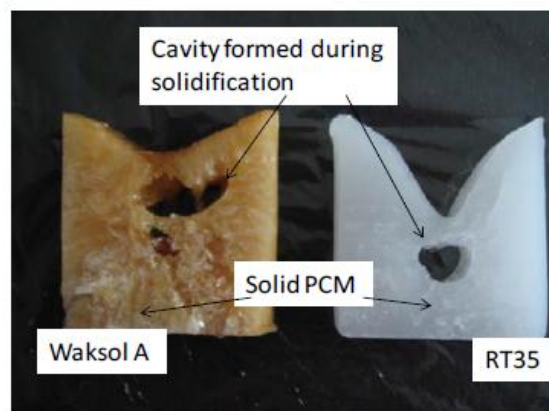


Figure 2 : Formation de cavités au cours de la solidification [8]

1. Modélisation Mathématique

Pour remédier à cette situation on propose dans ce travail de mettre le MCP dans des capsules inertes et dilatables et de les confiner dans une enceinte remplie d'un liquide qui ne change pas de phase dans le domaine de fonctionnement.

1.1 Configurations étudiées

On se propose d'étudier dans ce travail deux configurations.

La première configuration qu'on se propose d'étudier consiste à confiner le MCP dans une membrane élastique et inerte et le mettre dans une cellule étanche remplie d'eau afin d'empêcher le contact direct entre le MCP et la plaque électronique et éviter aussi la formation de bulles d'air.

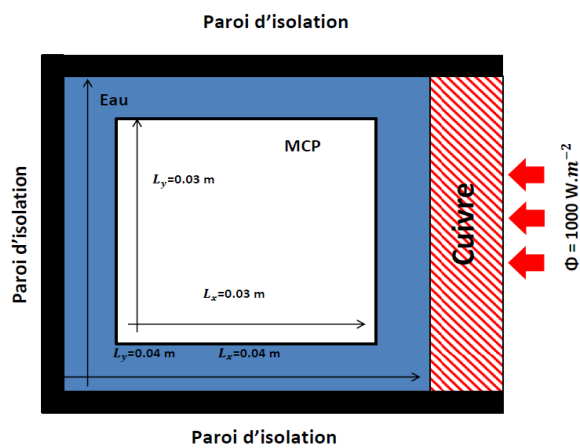


Figure 3 : Bloc de MCP entouré d'eau en contact directe avec la plaque chauffante

Enfin, afin d'augmenter la surface d'échange, on se propose dans la seconde configuration de découper le bloc du MCP en plusieurs parties égales.

On comparera nos résultats avec les résultats obtenus pour le cas de MCP en contact directe avec une plaque chauffante.

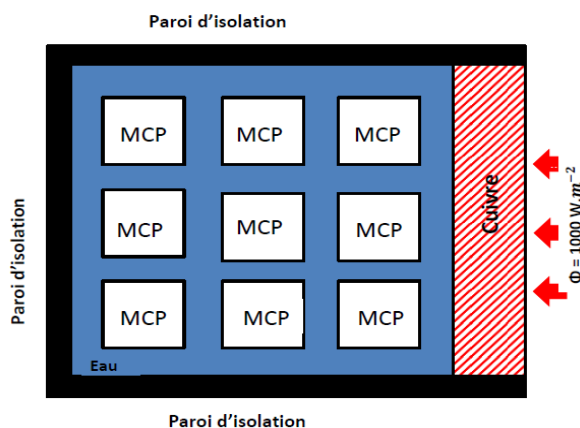


Figure 4 : Cellule de neuf blocs du MCP entouré d'eau

1.3 Hypothèses considérées

- Pour la modélisation du système on a adopté les hypothèses suivantes :
- Le transfert de chaleur est bidimensionnel (2D).
- Le MCP est pur.
- Le MCP est homogène et isotrope.
- L'écoulement est considéré laminaire, incompressible et la convection naturelle est prise en compte par le biais de l'hypothèse de Boussinesq.
- La phase liquide est newtonienne et incompressible.
- La dissipation visqueuse est négligeable.
- Le transfert par rayonnement est négligé.
- Les blocs du MCP occupent une position fixe dans l'enceinte.

1.4 Les équations :

Pour le MCP :

Equations de conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Equations de quantité de mouvement :

Composante selon O_x :

$$\rho_l \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_l \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + B u \quad (2)$$

Composante selon O_y :

$$\rho_l \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu_l \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho_0 g (T - T_0) + B v \quad (3)$$

Equations de l'énergie :

$$C_{peq} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda_{eq} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Dans ce problème, on est en présence de deux milieux (liquide et solide) avec une interface commune. Les caractéristiques de ces deux milieux sont distinctes pour chaque état. On introduit alors une variable H comprise entre 0 et 1 partant de la phase solide à la phase liquide. La fraction liquide H renseigne sur l'état du MCP liquide ou solide.

$$\begin{cases} H = 0 & \text{si } T < T_f \\ H = 1 & \text{si } T > T_f \end{cases} ; T_f : \text{La température de fusion} \quad (5)$$

Pendant le processus de résolution des équations de mouvement, les deux termes sources permettent d'annuler les vitesses dans la région solide. Un des modèles classiques pour la suppression de vitesse est celui de Darcy :

$$B = C \frac{(1-H^2)}{(H^3+b)} \quad (6)$$

La constante C doit être suffisamment élevée afin d'annuler les vitesses dans la région solide et b est un petit nombre introduit ici simplement pour éviter une division par zéro dans le cas d'une fraction liquide nulle [10].

Dans l'équation de l'énergie, les deux termes C_{peq} et λ_{eq} représentent respectivement la capacité volumique équivalente ($J.K^{-1}.m^{-3}$) et la conductivité thermique équivalente ($W.K^{-1}.m^{-1}$).

Ils s'écrivent sous la forme suivante :

$$C_{peq} = H(C_p)_l + (1 - H)(C_p)_s \quad (7)$$

$$\lambda_{eq} = H\lambda_l + (1 - H)\lambda_s \quad (8)$$

Pour la plaque de cuivre l'équation est donnée ci-dessous :

Equations de l'énergie :

$$C_{pcuivre} \left[\frac{\partial T}{\partial t} \right] = \lambda_{cuivre} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (9)$$

Dans le milieu occupé par l'eau :

Equations de conservation de la masse :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

Equations de quantité de mouvement :

Composante selon Ox :

$$\rho_{eau} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu_{eau} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (11)$$

Composante selon Oy :

$$\rho_{eau} \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu_{eau} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + \rho_0 g \beta_{eau} (T - T_0) \quad (12)$$

Equations de l'énergie :

$$C_{peau} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = \lambda_{eau} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (13)$$

Avec :

$$\beta_{eau} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \rho = 5,8 \cdot 10^{-5} \quad [11] \quad (14)$$

1.5 Les conditions aux limites

Afin de compléter la description du problème, on adopte les conditions aux limites suivantes :

Pour les vitesses on impose la condition d'adhérence à la paroi :

$$u(x = L_x; y; t) = v(x = L_x; y; t) = 0 \quad (15)$$

$$u(x = 0; y; t) = v(x = 0; y; t) = 0 \quad (16)$$

$$u(x; y = 0; t) = v(x; y = 0; t) = 0 \quad (17)$$

$$u(x; y = L_y; t) = v(x; y = L_y; t) = 0 \quad (18)$$

Les parois horizontales et la paroi verticale gauche sont maintenues adiabatiques :

$$\frac{\partial T}{\partial y}(x; y = 0, t) = \frac{\partial T}{\partial y}(x; y = L_y, t) = \frac{\partial T}{\partial x}(x = 0, t) = 0 \quad (19)$$

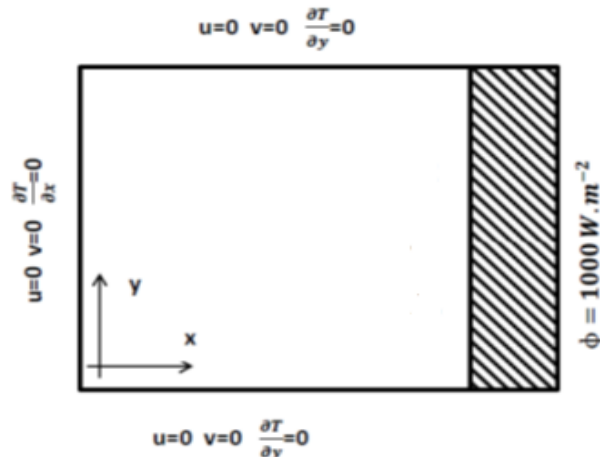


Figure 5 : Schéma descriptif des conditions aux limites

(a)

Propriétés physiques du MCP 27	Phase solide	Phase liquide
ρ ($kg.m^{-3}$)	1710	1530
C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	1751,5	2225
k ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	0,577	0,813
L_m ($J.kg^{-1}$)	172420	
T_f (K)	300,15	
μ ($Pa.s^{-1}$)	0,094	

(b)

Propriétés physiques	Eau
ρ ($kg.m^{-3}$)	998,3
μ ($Pa.s^{-1}$)	10^{-3}
C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	4185
k ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	0,6
β (K^{-1})	$3,3.10^{-4}$

(c)

Propriétés physiques de la plaque chauffante	cuiivre
ρ ($kg.m^{-3}$)	895
C_p ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)	385
k ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	410
épaisseur (m)	0,005

Tableau 1 : Propriétés physiques des éléments utilisés

1.6 Résolution numérique

La résolution numérique des équations décrites précédemment est effectuée par le logiciel de simulation numérique COMSOL Multiphysics.

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler plusieurs types de problèmes physiques et applications industrielles, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulations multi-physiques.

1.7 Validation du modèle

Afin de valider les résultats numériques obtenus nous comparons les résultats de notre simulation avec celles de **Z.Younsi [5]** (pour la fraction liquide) et de **Huang et al [9]** pour la température moyenne de la plaque.

1.7.1. Fraction liquide

Le MCP27 ($T_f = 300,15$ K) est initialement à une température uniforme

$T_i = 288,15$ K. La température de la paroi chauffée est à $T_H = 323,15$ K. La température de la paroi droite est à $T_c = 288,15$ K et les deux parois horizontales sont adiabatiques.

La comparaison entre les deux résultats est décrite par la Figure suivante :

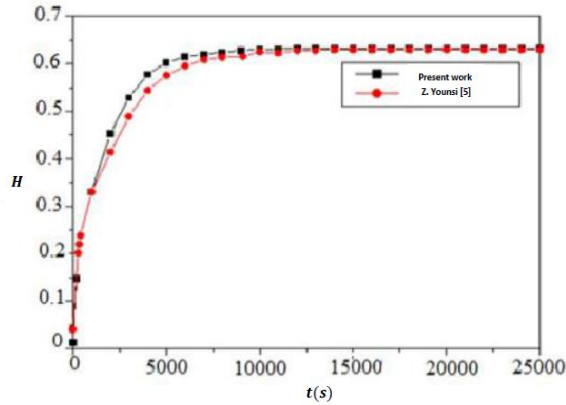


Figure 6 : Variation de la fraction de volume fondue

Nous pouvons constater que la concordance est satisfaisante.

1.7.2. La température moyenne

La paraffine est introduite dans une enceinte qui est en contact direct avec deux plaque d'aluminium. Celle de l'avant est chauffée par un flux de chaleur $\Phi = 750 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ tandis que la deuxième plaque est à température ambiante soit $T = 293.15 \text{ K}$. Le coefficient de transfert thermique convectif h de la plaque de l'avant est $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$ alors que celle de l'arrière est de $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

La comparaison entre les deux résultats est décrite par la Figure suivante :

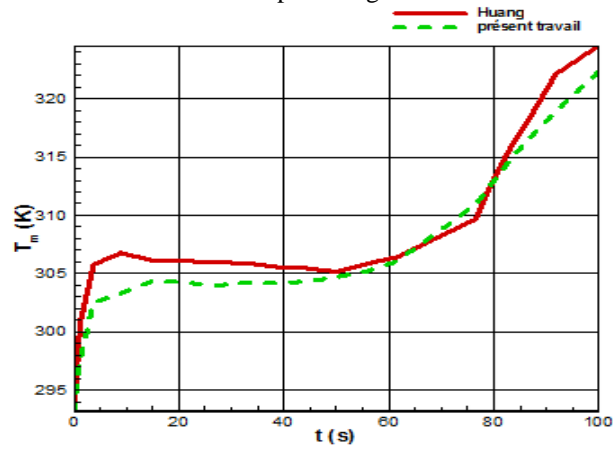


Figure 7 : Variation de la température moyenne de la première plaque

La différence entre les deux courbes ne dépasse pas le 2 degrés ce qui est amplement acceptable vu la complexité du phénomène étudié.

2. Simulation numérique

MCP en contact avec une plaque chauffante de cuivre :

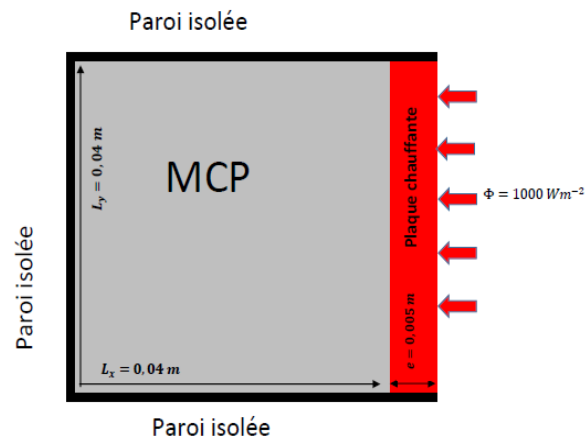


Figure 8 : MCP en contact avec une plaque chauffante

Le front de fusion et sens de circulation dynamique :

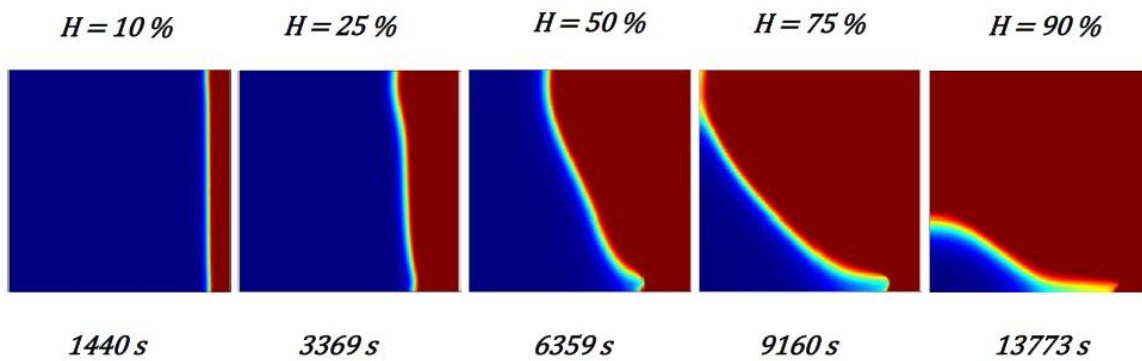


Figure 9 : Evolution de l'interface en fonction du pourcentage de fusion

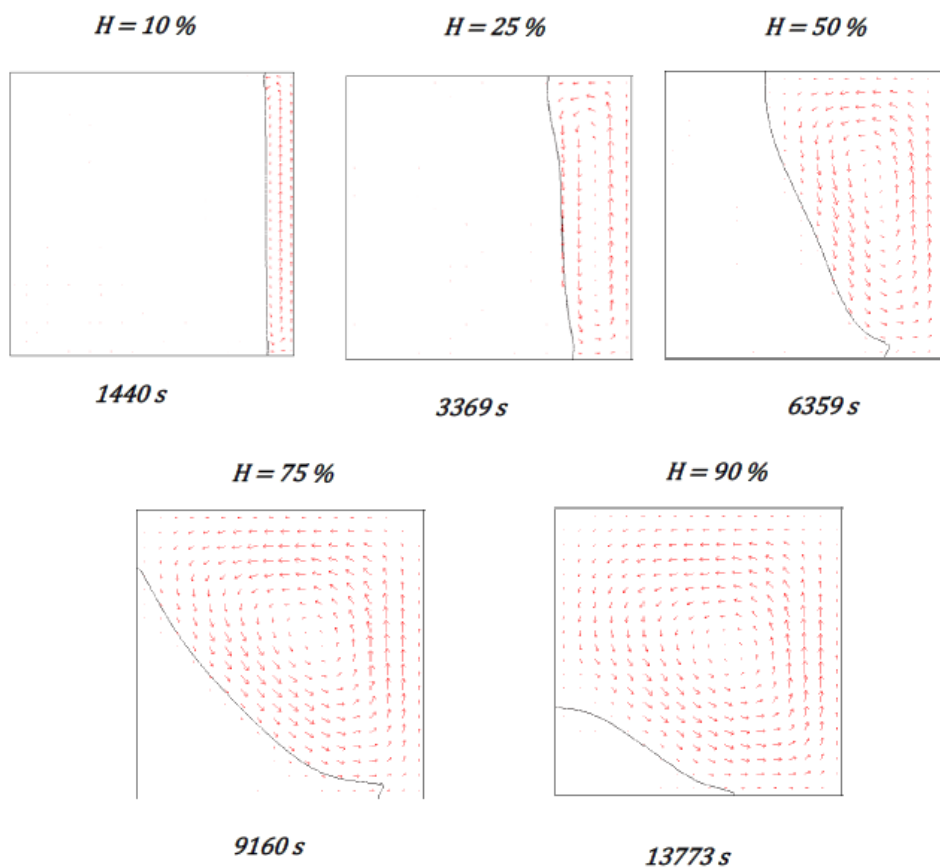


Figure 10 : Sens des vecteurs vitesse à l'intérieur du MCP

Au début, l'interface est parallèle à la plaque chauffante (conduction pure), et sous l'effet de la flottabilité, la zone fondue s'élargit en haut de la cellule (conduction + convection) Ce phénomène se poursuit jusqu'à la fusion totale.

Enceinte remplie d'eau confinant le MCP :

Afin de trouver des solutions de refroidissement des plaques chauffantes plus efficace, on se propose d'étudier des nouvelles techniques pour essayer de combler certaines difficultés dues au contact direct des plaques avec le MCP comme la formation des cavité des bulles d'air et la présence des zones de surchauffe

On se propose de confiner le MCP dans un fluide (l'eau)

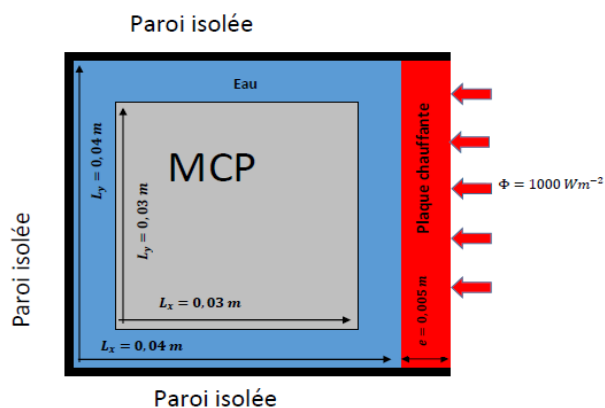


Figure 11 : Enceinte remplie d'eau confinant un bloc du MCP

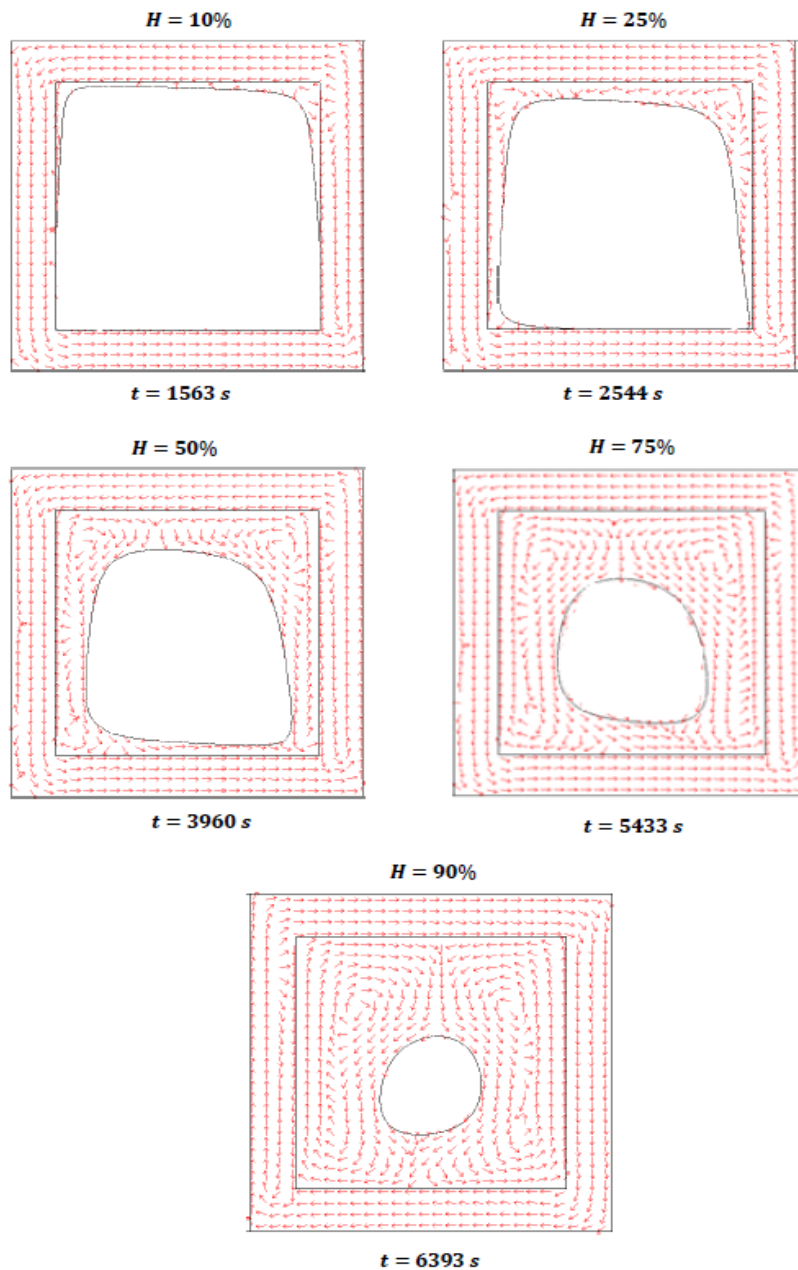


Figure 14 : Sens des vecteurs vitesse

La fusion ne s'effectue plus uniquement sur la face droite de la cavité, elle s'étale sur tout le périmètre. Ce phénomène est dû à la forte capacité thermique de l'eau. Il y'a formation d'un deuxième champ de circulation dynamique, les vecteurs vitesse suivent le mouvement du front de fusion.

Neuf blocs du MCP entouré d'eau :

Afin d'améliorer le transfert thermique, on augmente la surface d'échange.

Pour l'augmenter, on se propose de découper le même bloc de MCP en plusieurs parties égales (9 parties).

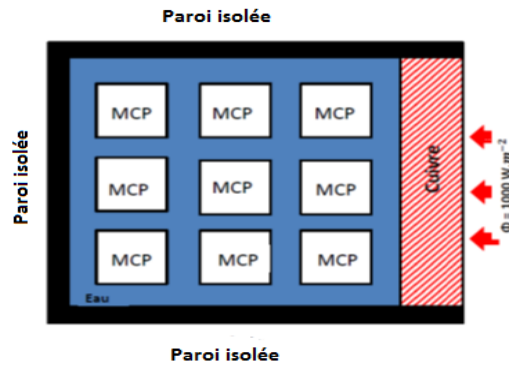


Figure 15 : Cellule de neuf blocs du MCP

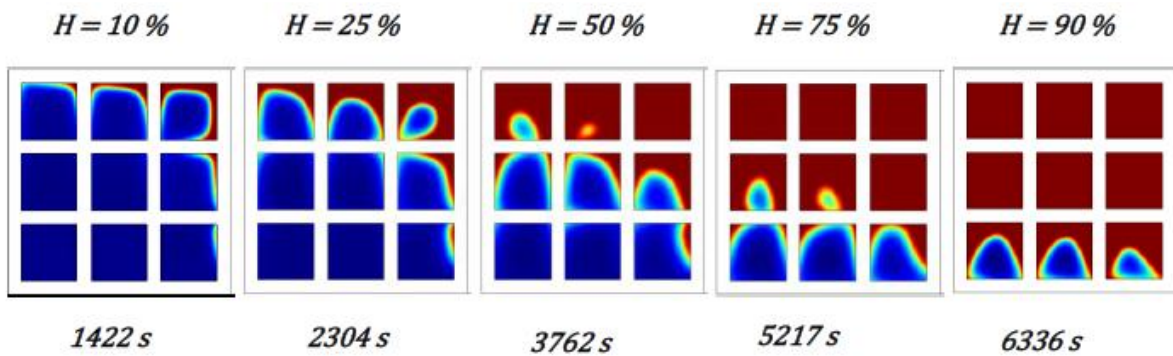


Figure 16 : Evolution du front de fusion du MCP en fonction du temps

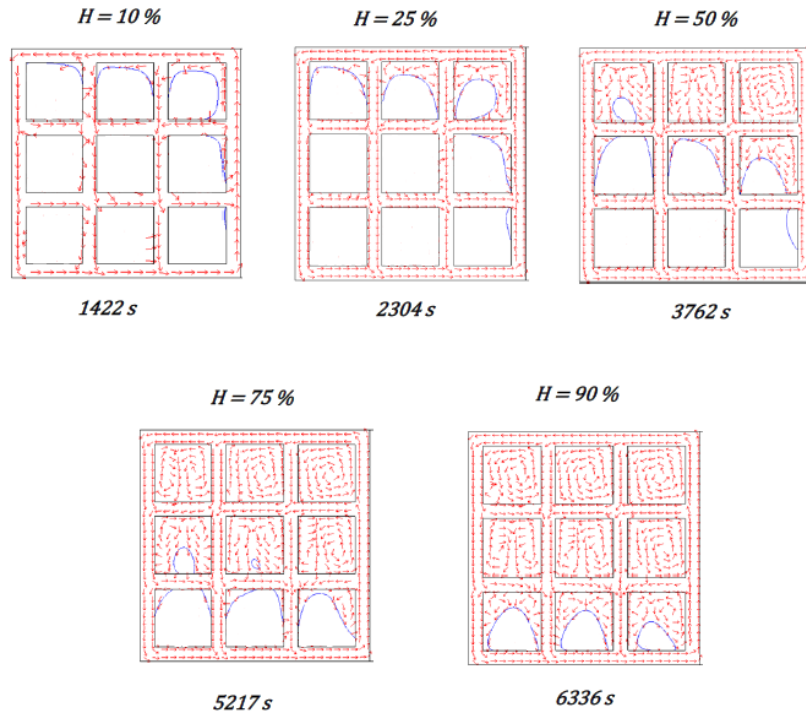


Figure 17 : Sens des vecteurs vitesse

Chaque bloc de MCP reproduit le même phénomène dynamique du deuxième cas (un bloc de MCP entouré d'eau), la fusion s'étale sur chaque périmètre grâce à la présence de l'eau entre les blocs du MCP. La fusion se fait de la droite vers la gauche et du haut vers le bas.

3. Analyse et comparaison

La fraction fondue :

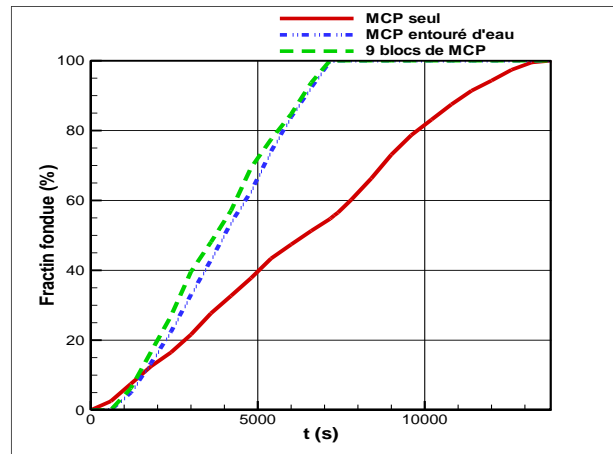


Figure 18 : Variation de la fraction fondue

D'après la fig.22 on remarque que la présence de l'eau entre la plaque chauffante et le bloc du MCP accélère la fusion totale. L'augmentation de la surface du contact entre le MCP et le fluide (le découpage du bloc du MCP en 9 parties égales) a amélioré le transfert de la chaleur ce qui a engendré une fusion un peu plus rapide.

La température moyenne de la plaque « T_p » :

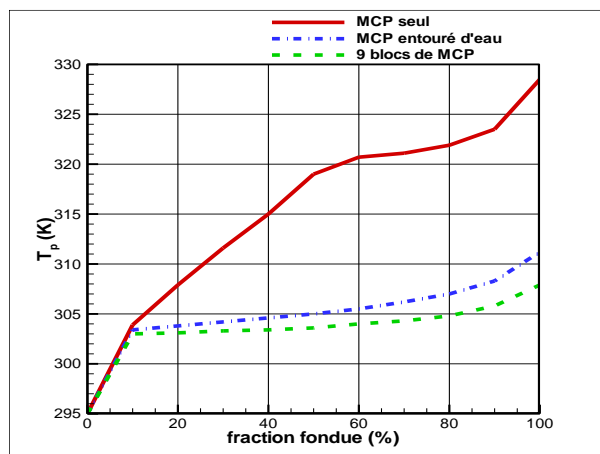


Figure 19 : La variation de la température moyenne de la plaque en fonction de la fraction fondue

D'après ces derniers résultats on remarque qu'en découpant le bloc du MCP, la température moyenne de la plaque T_p diminue.

Configurations	Temps nécessaire à la fusion totale (K)	Température moyenne de la plaque en absence du MCP (K)	Température moyenne de la plaque (K)	Diminution de la température moyenne de la plaque (K)
MCP en contact direct avec la plaque chauffante	13373	1091.2	328.5	
Un bloc de MCP confiné dans l'eau	7398	722.3	311.2	17.3
Neuf blocs de MCP confinés dans l'eau	7158	707.5	307.9	20.6

Tableau 2 : Variation de la température moyenne de la plaque en fonction du temps de la fusion totale

Conclusion

Cette étude nous a permis de déduire que le confinement du bloc de MCP dans l'eau permet de résoudre le problème de résistance à la paroi générée par l'infiltration de l'air entre le MCP et la plaque chauffante. D'autre part le découpage du bloc du MCP en plusieurs parties a permis d'augmenter la surface d'échange ce qui a eu pour résultat de diminuer la température moyenne de la plaque chauffante de l'ordre de 20 K, de plus on a gagné en temps de fusion totale (un peu plus qu'une heure) et en consommation du MCP (on a réussi à améliorer nos résultats même si on a diminué la quantité du MCP de 43% et en la remplaçant par l'eau).

Nomenclature

Symboles	Nom, unité	Symboles grecques
	B : Terme source.	β : Le coefficient de dilatation thermique, K^{-1}
	C_p : Capacité calorifique de la phase liquide, $J \text{ kg}^{-1} \cdot K^{-1}$.	ϕ : Le flux, $W \cdot m^2$.
	g : Accélération gravitationnelle, $m \cdot s^{-2}$.	λ : Conductivité thermique, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
	h : Coefficient de transfert convectif $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$.	ρ : Masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$.
	H : Fraction fondue.	μ : viscosité, $Pa \cdot s^{-1}$.
	k : Conductivité thermique de la phase liquide, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.	
	L : Longueur de la cavité, m .	Indices
	l : Longueur du bloc du MCP, m .	0 : Référence.
	t : Coordonnée de temps, s.	C : Froide.
	T : Température, K.	f : Fusion.
	u ; v : Composante de vitesse selon les coordonnées x et y, $m \cdot s^{-1}$.	H : Chaude.
	x ; y : Coordonnées spatiales, m .	i : Condition initiale.
		l : Phase liquide.
		p : Moyenne sur la plaque.
		s : Phase solide.
		x : Composante sur Ox.
		y : Composante sur Oy.

References

- [1] L. Yeh, Review of heat Transfer Technologies in Electronic Equipment, Journal of Electronic Packaging, 117 (1996) 333-339
- [2] N. Leoni, C.H. Amon, Bayesian surrogates for integrating numerical, analytical, and experimental data: application to inverse heat transfer in wearable computers, IEEE Trans. Compon. Packag. Technol. 23 (2000) 23-32.
- [3] Egan, E. and Amon, C.H., Thermal Design of Wearable Computers: Application to the Navigator2, Thermal Management Devices, and Embedded Electronics, EDRC Report No. 24-123-95, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 1995.
- [4] S.C. Fok, W. Shen, F.L. Tan, Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks, Int. J. Therm. Sci. 49 (2010) 109-117.
- [5] Z. Younsi, Etude expérimentale et numérique de matériau à changement de phase Intégration dans un composant solaire passif pour l'habitat, Faculté des Sciences Appliquées, Béthune, Thèses, (2008)
- [6] R. Kandasamy, X.Q. Wang, A.S. Mujumdar, Application of phase change materials in thermal management of electronics, Appl. Therm. Eng. 27 (2007) 2822-2832.
- [7] Xiang-Qi Wang, Arun S. Mujumdar, Christopher Yap, Effect of orientation for phase change material (PCM)-based heat sinks for transient thermal management of electric components, International Communications in Heat and Mass Transfer 34 (2007) 801-808.
- [8] M. Huang, P. Eames, B. Norton and N. Hewitt, Natural convection in an internally finned phase change material heat sink for the thermal management of photovoltaics, Solar Energy Materials & Solar Cells, 95:1598-1603. (2011).
- [9] M.J. Huang, P.C. Eames, B. Norton, Comparison of a small-scale 3D PCM thermalcontrol model with a validated 2D PCM thermalcontrol model, Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 1961-1972.
- [10] B. J. Jones, D. Sun, S. Krishnan and S. Garimella Experimental and numerical study of melting in a cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer 49 2724-2738 (2006).
- [11] J. Boussinesq, Théorie analytique de la chaleur, Gauthier Villars. (1901-03).

