

Etude numérique de la fusion dominée par la convection naturelle dans une cavité chauffée par le bas: Application au refroidissement passif des ordinateurs portables

Mustapha Faraji*

Laboratoire de Physique des Matériaux, Microélectronique, Automatique et Technique
Département de Physique, Faculté des Sciences Ain Chock
Université Hassan II, Casablanca, Maroc

(reçu le 22 Août 2010 – accepté le 25 Septembre 2011)

Résumé - Dans le présent travail, on étudie la fusion conjuguée à la convection naturelle dans un matériau à changement de phase (MCP) utilisé pour dissiper la chaleur générée au sein des sources de chaleur protubérantes sur un substrat horizontal (microprocesseurs récemment utilisés dans les ordinateurs portables). L'avantage d'utiliser cette stratégie de refroidissement est que les MCP sont capables d'absorber une importante quantité de chaleur générée par les microprocesseurs sans utiliser de ventilateur. Cette stratégie proposée est pratique pour des situations où le refroidissement par convection forcée de l'air ambiant est impossible, comme c'est le cas pour les futures générations des ordinateurs portables de haute puissance et de faibles dimensions. Un modèle mathématique (2D), basé sur les équations de conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement, est développé pour le puits de chaleur proposé. Les équations obtenues sont discrétisées en utilisant l'approche des volumes de contrôle, la méthode enthalpique est adoptée pour localiser la position du front de fusion. Plusieurs investigations numériques sont effectuées pour analyser l'effet de la puissance des sources de chaleurs sur l'efficacité du refroidisseur. La température des composants électroniques, la quantité du MCP fondue et la position du front de fusion sont influencées par la puissance des sources de chaleurs. Une corrélation pour la durée de fonctionnement sécurisé des composants électroniques (temps requis par le puits de chaleur pour atteindre la température critique, T_{cr}) est développée.

Abstract - This work describes and analyses a novel laptop's thermal management system based on a phase change material (PCM) heat storage reservoir. The proposed heat sink consists of a PCM filled horizontal enclosure heated by substrate-mounted protruding heat sources (micro processors used in recent Laptops). PCMs, characterized by high energy storage density and small transition temperature interval, are able to store a high amount of generated heat; which provides a passive cooling of microprocessors. The advantage of this cooling strategy is that the phase change materials are able to absorb a high amount of generated heat without operating fan. The proposed strategy is suitable and efficient for situations where the cooling by air convection is not practical (thermal control of recent multiprocessors laptops computers, for example). The problem is modelled as, two dimensional, time dependent and convection-dominated phenomena. A finite volume numerical approach is developed and used to simulate the physical details of the problem. This approach is based on the enthalpy method which is traditionally used to track the motion of the liquid/solid front and obtain the temperature and velocity profiles in the liquid phase. The study gives an instruction on the presentation of PCM heat sink used for cooling management of recent computers. Numerical investigations have been conducted in order to examine the impact of microprocessors power rate on the thermal behaviour and efficiency of the proposed PCM-based heat sink. Correlation for

* farajimustapha@yahoo.fr

the secured operating time (time required by the heat sink before reaching the critical temperature, T_{cr}) was developed.

Mots clés: Refroidissement passif – Composant électronique protubérant - Stockage de chaleur latent - Chauffage par le bas - Convection naturelle - Ordinateur portable.

1. INTRODUCTION

Actuellement, les ordinateurs portables occupent une place importante dans la vie des personnes et commencent à remplacer les ordinateurs de bureau. L'augmentation de la fréquence des microprocesseurs (CPU) a encouragé les industriels à fabriquer des ordinateurs portables performants de faibles dimensions, mais avec une haute dissipation de la chaleur [1].

Si un puits de chaleur convenable n'est pas installé, la performance de l'appareil électronique et sa durée de vie risqueront d'être réduites et même peut constituer un danger pour l'utilisateur [2]. Les composants électroniques sont refroidis, en général, par convection naturelle ou forcée à l'air ambiant.

Mais pour le cas des futurs ordinateurs portables de faible épaisseur (< 5 mm), le refroidissement par convection forcée n'est plus pratique. Le contrôle thermique de composants électroniques par les matériaux à changement de phase (MCP) a reçu, récemment, une grande attention due, fondamentalement, à leur haute capacité d'extraire et de stocker la chaleur, comparée aux liquides et à l'air.

Plusieurs stratégies ont été explorées pour améliorer la capacité de refroidissement et de stockage sous forme de chaleur latente de fusion. Le concept est simple, il consiste à placer une cavité remplie d'un MCP qui absorbe l'énergie dissipée par les sources de chaleurs sous forme de chaleur latente de fusion.

Le processus doit s'arrêter lorsque le MCP fond complètement. Durant la période d'arrêt, le MCP se solidifie et pourra être utilisé dans le cycle de refroidissement suivant [3]. L'introduction des matériaux à changement de phase pour dissiper la chaleur provenant des microprocesseurs permet d'éliminer le ventilateur qui fonctionne incessamment, ce qui permettra, d'une part, de réduire le bruit sonore et d'économiser l'énergie de la batterie et contribuera, d'autre part, à l'allongement de l'autonomie des ordinateurs portables.

Dans ce sens, un puits de chaleur hybride constitué d'une cavité rectangulaire remplie d'un MCP (SunTeck 111) attachée à une ailette rectangulaire avec une densité de flux de chaleur imposée à sa base a été analysé par Faraji *et al.* [4, 5]. Les simulations menées par les auteurs ont permis d'optimiser le puits de chaleur sans atteindre la surchauffe du microprocesseur.

Pal *et al.* [6] ont contribué par une étude de refroidissement d'un composant électronique, d'une part, à travers une cavité d'air de rapport de forme élevé (>10) et, d'autre part, à travers une mince couche de MCP (n-triacontane). Le composant électronique est installé sur un substrat qui sépare la couche de MCP de l'enceinte d'air. Il s'agit d'une étude numérique réalisée avec et sans MCP.

Les résultats montrent que la présence de la couche de MCP diminue la température moyenne du composant électronique pendant une durée relativement longue. Leur modèle trouve des applications dans le secteur aéronautique.

Afin de démontrer l'intérêt de l'introduction des MCP dans les puits de chaleur, des études expérimentales relatives à la fusion du MCP (n-octadécane) à l'intérieur d'une cavité chauffée par des sources de chaleur surfaciques griffées sur une paroi verticale en Plexiglas, ont été menées par Zhang *et al.* [7].

Les tests effectués montrent que le refroidissement des composants électroniques par le MCP permet de réduire leur température jusqu'à 50 % en comparaison avec leur refroidissement par convection naturelle avec l'éthylène glycol.

Ju *et al.* [8] ont analysé expérimentalement une configuration similaire à celle traitée dans ce présent papier, mais avec des sources de chaleur protubérantes sujettes à une condition simple de densité de flux constante à la base de chacune.

Les sources sont griffées sur une paroi verticale de la cavité. L'effet de la protubérance sur la température maximale des sources est rapporté. Il s'est avéré que la température des sources protubérantes est trouvée inférieure à celle enregistrée par des sources surfaciques. Une corrélation donnant le nombre de Nusselt moyen de chaque source de chaleur, en régime quasi stationnaire, en fonction du nombre de Rayleigh a été établie.

Binet *et al.* [9] ont effectué une série de simulations numériques afin de déterminer les effets de la configuration des sources de chaleur, du rapport de forme de l'enceinte et des propriétés thermiques de la paroi sur la fusion d'un MCP.

Les résultats montrent que, pour des cavités de grand rapport de forme (> 4), le front de fusion se situe au dessus des sources et se déplace horizontalement et la température présente une stabilité couplée à une durée de fusion relativement longue. Ce qui fait de cette configuration un choix intéressant pour les applications reliées au refroidissement des composants électroniques.

Les résultats montrent, aussi, que les cavités avec des rapports de forme > 4 contrôlent mieux la température des composants électroniques et offrent une durée allongée de la fusion.

Le but de la présente étude est de présenter une analyse numérique du refroidissement de composants électroniques protubérants montés sur un substrat horizontal en introduisant un matériau à changement de phase.

Cette stratégie de refroidissement consiste à placer une cavité remplie d'un MCP sur le CPU pour absorber la chaleur qui y est générée et tente à effectuer un refroidissement passif et sécurisé sans faire fonctionner le ventilateur.

Après validation du code de calcul par des résultats expérimentaux publiés, des investigations numériques ont été menées afin d'étudier la performance thermique du puits de chaleur proposé.

Les effets de la puissance des sources de chaleur, Q' , sur les champs thermique et dynamique, la position du front de fusion et la durée de fonctionnement sécurisé des sources de chaleur sont présentés et analysés.

2. FORMULATION DU PROBLEME

La Figure 1 schématise le système de refroidissement étudié. Il consiste en une cavité horizontale, isolée thermiquement et remplie d'un MCP (n-eicosane; $T_f = 36^\circ\text{C}$),

de hauteur (H_m) et de longueur (L_m). La paroi inférieure de la cavité est formée d'une plaque conductrice (substrat) d'épaisseur (X_s).

Cette paroi supporte trois composants électroniques rectangulaires et identiques simulés par des sources de chaleur $S_{i=1,3}$. Les sources de chaleur, ayant une épaisseur (X_c), génèrent une puissance volumique interne, constante et uniforme Q' . L'écoulement dans la phase liquide est supposé 2D, newtonien, laminaire, et incompressible.

Les propriétés thermo physiques des matériaux sont constantes dans la plage des températures étudiées. L'approximation de Boussinesq est utilisée dans la phase liquide du MCP. Le changement de phase est isotherme. Le MCP est supposé, initialement, solide à $T_0 = T_f$.

La chaleur spécifique, C_p , du MCP est supposée constante. La température de référence est apportée au point de fusion ($T_{ref} = T_f$). La densité de référence est celle du MCP ($\rho_{ref} = \rho_m$).

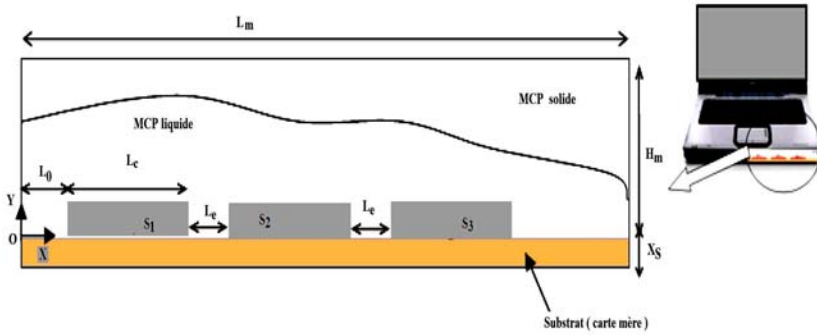


Fig. 1: Puits de chaleur

Le système de refroidissement proposé doit s'arrêter, lorsque le MCP est complètement fondu, $f \approx 1$, ou lorsque la température maximale d'un composant électronique atteint la valeur critique fixée par le fabricant, $T_{max} \approx T_{cr}$.

Sur la base des hypothèses susmentionnées et en utilisant la méthode d'enthalpie-porosité présentée par Voller *et al.* [10], les équations gouvernant les transferts de masse, de la quantité de mouvement et de chaleur au sein de la plaque conductrice, du MCP et des sources de chaleur sont données comme suit:

Equation de la conservation de la masse

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

Equation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v u) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + S_u \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u v) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right) + S_v \quad (3)$$

Equation de l'énergie

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u h) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v h) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{C_p} \times \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{C_p} \times \frac{\partial h}{\partial y}\right) + S_h \quad (4)$$

avec:

$$h = \int_{T_t}^T C_p dT + h(T_h) \quad , (h(T_f) = 0) \quad (5)$$

$$s_u = -C \times \frac{(1-f)^2}{(f^3 + b)} \times u \quad (6)$$

$$s_v = -C \times \frac{(1-f)^2}{(f^3 + b)} \times v + \rho g \beta \times (T - T_f) \quad (7)$$

$$s_h = \delta_1 \left(-(1 - \delta_2) \rho \Delta H_f \frac{\partial f}{\partial t} + \delta_2 \times \frac{Q'}{X_c L_c} \right) \quad (8)$$

L'équation de la quantité de mouvement est similaire à celle d'un milieu poreux avec une porosité nulle dans les zones solides et une porosité infinie dans la zone liquide, {Eqs. (6) et (7)}.

Les mêmes équations gouvernent les transferts de chaleur et de la quantité de mouvement dans les régions solides (MCP non fondu, sources de chaleur, plaque conductrice) et dans le MCP liquide avec la prise en compte d'une grande valeur de la viscosité dynamique dans les zones solides [11]. Les paramètres δ_1 et δ_2 et la conductivité thermique, k , figurant dans l'équation de l'énergie, sont donnés comme suit:

$$k = \begin{cases} k_m & \text{MCP} \\ k_s & \text{Plaque conductrice} \\ k_c & \text{Sources de chaleur} \end{cases}$$

$$\delta_1 = \begin{cases} 1 & \text{Sources de chaleur et MCP} \\ 0 & \text{Plaque conductrice} \end{cases} \quad (9)$$

$$\delta_2 = \begin{cases} 1 & \text{Sources de chaleur} \\ 0 & \text{MCP} \end{cases}$$

Conditions aux limites et initiales

Les équations précitées sont assujetties aux conditions aux limites et initiales suivantes:

- Aux interfaces entre deux matériaux différents, 1 et 2

$$T_1 = T_2 \quad \text{et} \quad k_1 \left. \frac{\partial T}{\partial \eta} \right|_1 = k_2 \left. \frac{\partial T}{\partial \eta} \right|_2 \quad (10)$$

- Sur les parois adiabatiques

$$\left. \frac{\partial T}{\partial \eta} \right|_{\text{paroi}} = 0 \quad \text{avec} \quad \eta \text{ perpendiculaire à interface} \quad (11)$$

- Non glissement et imperméabilité sur les parois solides

$$u = v = 0 \quad (12)$$

- Conditions initiales

$$u = v = 0 \quad ; \quad f = 0 \quad ; \quad T = T_f \quad (13)$$

- La conductivité thermique aux interfaces, k_i , et la conductivité thermique du MCP sont données comme suit:

$$k_i = \frac{k_+ k_- (\delta_+ + \delta_-)}{k_+ \delta_- + k_- \delta_+}; \quad k_m = k_{m,1} f + (1-f) k_{m,s}; \quad \alpha_m = f \alpha_{m,1} + (1-f) \alpha_{m,s} \quad (14)$$

Avec, δ_+ la distance séparant l'interface et le point voisin appartenant au matériau '+', et, δ_- , la distance séparant l'interface et le point voisin appartenant au matériau '-'.

Dans les équations ci-dessus, S_u et S_v sont deux termes sources utilisés pour annuler la vitesse dans les régions solides (MCP solide, plaque conductrice, sources de chaleur). Une des techniques utilisée pour la suppression des vitesses est l'introduction d'un terme de Darcy [10], en choisissant $C = 10^{25} \text{ kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ et $b = 0,005$.

La valeur de la constante C dépend, en principe, de la morphologie du milieu poreux. La quantité b est introduite ici simplement pour éviter une division par zéro dans le cas d'une fraction liquide nulle.

Numériquement, le rapport C/b doit être suffisamment élevé afin d'annuler les vitesses dans la région solide. La méthode enthalpique consiste à formuler l'équation d'énergie en terme d'enthalpie sensible. Le terme source de cette équation reflète le changement de phase.

Dans le cas des corps purs, où le changement de phase se fait à température constante, $T = T_f$, la fraction liquide, f , est donnée par la relation suivante:

$$\begin{cases} f = 1 & \text{si } T > T_f \\ f = 0 & \text{si } T < T_f \\ 0 < f < 1 & \text{si } T = T_f \end{cases} \quad (15)$$

Le système d'équations ainsi obtenu est intégré numériquement sur un maillage décalé moyennant la méthode de volume de contrôle de Patankar [11]. L'algorithme SIMPLE est utilisé pour traiter le couplage pression/vitesse. Un maillage non uniforme

60×120 , serré du côté des régions solides est adopté pour capturer plus de détails sur le comportement dynamique proche aux interfaces.

Un pas de temps de 10 s a été trouvé suffisant. D'autres maillage et pas de temps, plus réduits, ont été testés sans toutefois apporter d'écarts appréciables sur les résultats numériques

Pour évaluer le taux de transfert de chaleur par convection naturelle évacué par chaque source de chaleur, on calcule le nombre de Nusselt moyen, de chaque source de chaleur, basé sur la température maximale, $T_{\max}$, est défini comme suit:

$$Nu_{1,2,3} = -\frac{1}{(L_c + 2X_c) T_{\max} - T_f} \times \int_0^{L_c + 2X_c} k_i \times \left. \frac{\partial T}{\partial \eta} \right|_i \times d\xi \quad (16)$$

où, $d\xi$ désigne l'élément de longueur sur le périmètre de la source de chaleur.

Les résultats du présent code numérique, élaboré en C++, sont comparés avec les résultats expérimentaux obtenus par Ju *et al.* [8] relatifs au problème bidimensionnel de fusion d'un MCP (noctadécane, $T_f = 28^\circ\text{C}$) dans une enceinte chauffée par trois sources de chaleur protubérantes sur une paroi verticale avec une densité de flux de 900 W/m^2 , imposée à la face gauche de chaque source de chaleur.

L'enceinte utilisée dans cette expérience est similaire à celle étudiée dans le présent travail. Elle est disposée verticalement. Les dimensions utilisées dans cette expérience sont présentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Paramètres géométriques de l'expérience de Ju *et al.* [8]

X_c (m)	L_c (m)	L_e (m)	L_h (m)	H_m (m)	X_s (m)	L_m (m)
0.009	0.015	0.015	0.0075	0.09	0.02	0.06

L'évolution temporelle de la température maximale des trois sources de chaleur a été rapportée par l'expérience de Ju *et al.* [8] et est comparée avec celle prédite par le présent code numérique. La comparaison est illustrée à la Figure 2. L'analyse d'une telle figure montre que l'accord est satisfaisant, en particulier pour $t \leq 50 \text{ min}$. Cette période est caractérisée par la prédominance de la conduction thermique, les sources de chaleur ont pratiquement la même température.

En effet, la puissance fournie à chaque source ne diffuse pratiquement pas au travers le Plexiglas à cause de sa faible conductivité thermique. En conséquence, la puissance fournie est stockée sous forme de chaleur sensible et cause l'accroissement des températures des sources de chaleur.

Avec la progression de la fusion, les poches liquides entourant les sources de chaleur fusionnent et les mouvements convectifs se manifestent dans toute la région liquide.

Ainsi, la puissance fournie aux sources de chaleur est évacuée par convection naturelle au MCP liquide; le système atteint, ainsi, un régime quasi stationnaire marqué par une stabilité relative des températures des sources de chaleur.

Il est à noter que la différence des températures des sources de chaleur est expliquée par le fait qu'au début de l'établissement de la convection naturelle les flux de chaleur évacués par les sources diminuent dans le sens ascendant. Ceci est dû à l'échauffement

des particules liquides dans leur mouvement ascendant ($T_1 = 34^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 35^{\circ}\text{C}$ et $T_3 = 38^{\circ}\text{C}$).

La Figure 2 montre que le présent code numérique reproduit fidèlement ce comportement physique. L'écart maximal enregistré entre les prédictions numériques et les résultats expérimentaux a été estimé à 2 %.

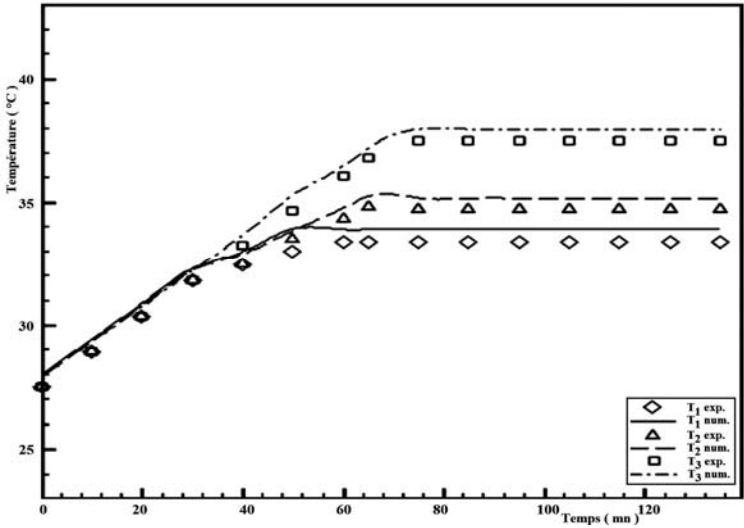


Fig. 2: Evolutions temporelles des températures maximales expérimentales [8] et numériques des sources de chaleur

3. RESULTATS ET DISCUSSION

Les investigations numériques sont conduites initialement en utilisant les données des **Tableaux 2 et 3**. Ces dimensions correspondent à celles fréquemment utilisées en électronique. Initialement le MCP est solide et la température du système est $T_0 = T_f = 36^{\circ}\text{C}$. Les composants électroniques étudiés sont de type microprocesseur de 4^{ème} génération à deux noyaux doubles (CPU 2 Core Duo, utilisés dans l'ordinateur portable) [12-14].

Dans la présente étude, la puissance générée par chaque source de chaleur, par unité de longueur, varie entre 10 W/m, $Ra = 8,363 \times 10^8$ et 60 W/m, $Ra = 5,018 \times 10^9$. La température critique à ne pas dépasser pour assurer un fonctionnement sécurisé des composants électroniques est de l'ordre de 70 °C ($T_{cr} = 70^{\circ}\text{C}$)[12].

Tableau 2: Propriétés thermo physiques [12-16]

Source de chaleur (alumine-céramique)	$\rho_c = 3260 \text{ kg/m}^3$; $C_{p,c} = 740 \text{ J/kgK}$
	$k_c = 170 \text{ W/mK}$; $T_{cr} = 70^{\circ}\text{C}$
Plaque (Substrat d'alumine)	$\rho_s = 3900 \text{ kg/m}^3$; $C_{p,s} = 900 \text{ J/kgK}$
	$k_s = 19,7 \text{ W/mK}$
MCP	$\beta = 8,5 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; $\Delta H_f = 2,47 \times 10^5 \text{ J/kg}$;

(n-eicosane)	$T_f = 36\text{ °C}; C_{p,m} = 2460\text{ J/kgK}; \rho_m = 769\text{ kg/m}^3$
	$k_m = 0,1505\text{ W/mK}; \mu_m = 4,15 \times 10^{-4}\text{ kg/ms}$

Tableau 3: Dimensions des différents composants de la conférence de référence

$X_c\text{ (m)}$	$L_c\text{ (m)}$	$L_e\text{ (m)}$	$L_0\text{ (m)}$	$H_m\text{ (m)}$	$X_s\text{ (m)}$	$L_m\text{ (m)}$
0.003	0.015	0.010	0.050	0.020	0.005	0.200

Le volume du MCP ($H_m L_m - 3 X_c L_c$) utilisé est représenté par la longueur caractéristique, H_c . Cette quantité est choisie de telle sorte que la durée minimale de fonctionnement du puits de chaleur pour la puissance maximale par unité de longueur ($Q' = 60\text{ W/m}$) soit de l'ordre d'une heure. Cette durée est calculée en supposant que toute la puissance générée par unité de longueur par les sources de chaleur sert uniquement à la fusion du MCP. Cette durée est donnée par l'expression:

$$t_{\min} = \frac{\rho_m \times \Delta H_f \times H_c^2}{3 Q'} \quad (17)$$

Ainsi, en utilisant l'expression (18), la longueur $H_c = \sqrt{L_m H_m - 3 X_c L_c}$ est égale à 0.06 m. Il faut aussi noter que le calcul des nombres de Rayleigh est basé sur la longueur caractéristique, H_c , et une puissance générée par unité de profondeur, Q' .

$$Ra = \frac{g \times \beta \times H_c^3 3 Q' / k_{m,1}}{\nu_{m,1} \times \alpha_{m,1}} \quad (18)$$

3.1 Analyse du comportement thermique et hydrodynamique du puits de chaleur

Afin d'éclaircir les phénomènes thermiques et hydrodynamique se manifestant dans la cavité du MCP, on fera appel aux Figures 3, 4 et 5.

L'analyse des Figures 3 et 4 permet de constater que, pour une puissance modérée, $Q' = 10\text{ W/m}$, l'évolution temporelle de la température moyenne des sources de chaleur et du nombre de Nusselt moyen Nu , se fait en trois phases principales (pré-fusion, fusion et post fusion).

Pendant la première phase du processus de fusion, le transfert de chaleur se fait par conduction thermique dans la mince couche du MCP liquide, qui s'étale le long de la paroi inférieure et au voisinage des sources. La grande partie de la puissance générée est stockée dans le MCP liquide, dans le substrat et au sein des sources, sous forme de chaleur sensible. Comme le régime est purement conductif, le nombre de Nusselt moyen, Nu , subit une chute et les isothermes demeurent parallèles à la paroi chaude inférieure et aucun mouvement de convection naturelle n'est intercepté pour $t < 1000\text{ s}$, comme illustré sur la Figure 5a, à l'instant, $t = 300\text{ s}$. La durée de cette phase dépend de la puissance des composants électroniques.

Avec la progression du temps, des poches liquides prennent naissance au voisinage des faces des composants électroniques, s'élargissent et favorisent, ainsi, l'établissement des mouvements de convection naturelle. Le transfert de chaleur s'intensifie et les

isothermes, dans le MCP liquide, subissent incessamment des déformations engendrées par le mouvement du fluide (Fig. 5a, $t > 1000$ s).

L'apparition des cellules convectives de Rayleigh-Bénard dans la zone du MCP fondu (Fig. 5b, $t = 5000$ s) provoque la rotation du fluide et l'apparition des jets de mur (structure en panache). Le MCP liquide extrait plus de chaleur de la paroi chaude et la cède, ensuite, au front de fusion. Le front de fusion constitue la paroi froide ($T = T_f = 36^\circ\text{C}$), elle progresse rapidement et s'approche de la paroi supérieure de la cavité.

La convection naturelle s'intensifie, en conséquence, le nombre de Nusselt augmente, atteint une valeur maximale et demeure constant pendant une longue période (Fig. 3). Durant cette seconde phase du processus de fusion, pratiquement toute la chaleur extraite des composants électroniques est transmise au front de fusion, cette chaleur est absorbée sous forme de chaleur latente de fusion.

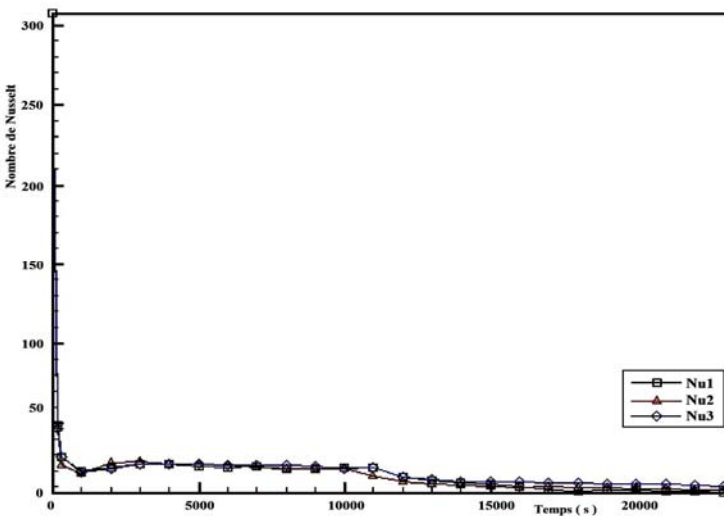


Fig. 3: Evolution temporelle du nombre de Nusselt moyen, Nu , pour les trois sources de chaleur, $Q' = 10 \text{ W/m}$

La vitesse de fusion est constante et la fraction liquide progresse linéairement (Fig. 4). Par conséquent, la température moyenne des composants électroniques et celle du MCP liquide demeurent constantes (Fig. 4). Quand le processus de fusion s'approche de sa fin, la température du MCP liquide s'accroît (Fig. 4), ce qui cause la réduction des gradients thermiques entre les sources de chaleur et le MCP liquide.

En effet, on peut remarquer que le nombre de Nusselt moyen, décroît de nouveau (Fig. 3), donc une baisse du taux de transfert de chaleur entre les composants électroniques et le MCP liquide, et par la suite, une réduction de la vitesse de fusion accompagnée d'une augmentation de la température des composants électroniques comme illustré sur la figure 4.

Une stratification thermique commence à apparaître dans la partie supérieure de la cavité, et la conduction thermique dans la phase liquide est réactivée, on est dans la troisième phase du processus de fusion (Fig. 5a, $t = 23000$ s).

Le système de refroidissement doit s'arrêter lorsque $f \approx 1$ ou $T_{\max} \approx T_{\text{cr}}$.

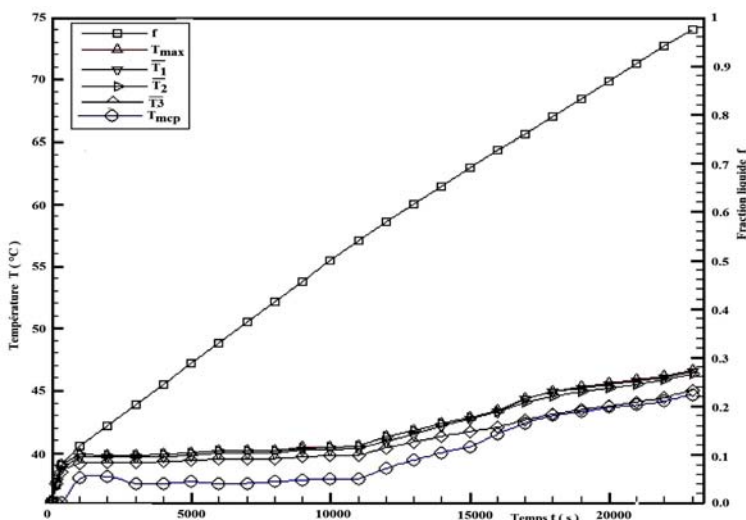


Fig. 4: Evolution temporelle de la fraction liquide, de la température maximale et des températures moyennes des sources de chaleur et du MCP, $Q' = 10 \text{ W/m}$

Il est à noter que la deuxième phase du processus de fusion, est la plus importante du cycle de refroidissement. L'utilisation des matériaux à changement de phase permet d'obtenir un régime de fonctionnement quasi stationnaire, d'une durée relativement importante.

La température des composants électroniques est maintenue constante à un niveau inférieur à la température critique, sans recours au ventilateur. La durée de refroidissement passif réalisée dépend de la puissance des sources de chaleur (environ 6 heures pour une puissance, $Q' = 10 \text{ W/m}$).

L'analyse de la Figure 5a montre que les contours de température sont disposés concentriquement au sein de chaque composant électronique. Cette allure est typique aux sources de chaleur avec génération volumique interne de la puissance. Aussi, il est important de signaler que la plaque conductrice (substrat) n'est pas isotherme. En effet la différence de température prélevée dans la plaque peut dépasser 4°C (Fig. 5a, $t = 23000 \text{ s}$).

L'étude de la Figure 5b permet, aussi, de constater que les cellules formées au début dans les régions situées entre deux sources de chaleurs consécutives, tournent dans le sens horaire et anti horaire alternativement, se gonflent, et ne peuvent y séjourner longtemps. En effet, les forces de poussée, créées par les parois chaudes inférieures, s'amplifient avec le temps et poussent les petites cellules à l'extérieur des micros cavités (espace situé entre deux sources consécutives) pour $t \geq 5000 \text{ s}$. Les petites cellules sont entraînées et absorbées par l'écoulement principal. L'écoulement multi cellulaire au départ se transforme en monocellulaire à la fin du processus de fusion.

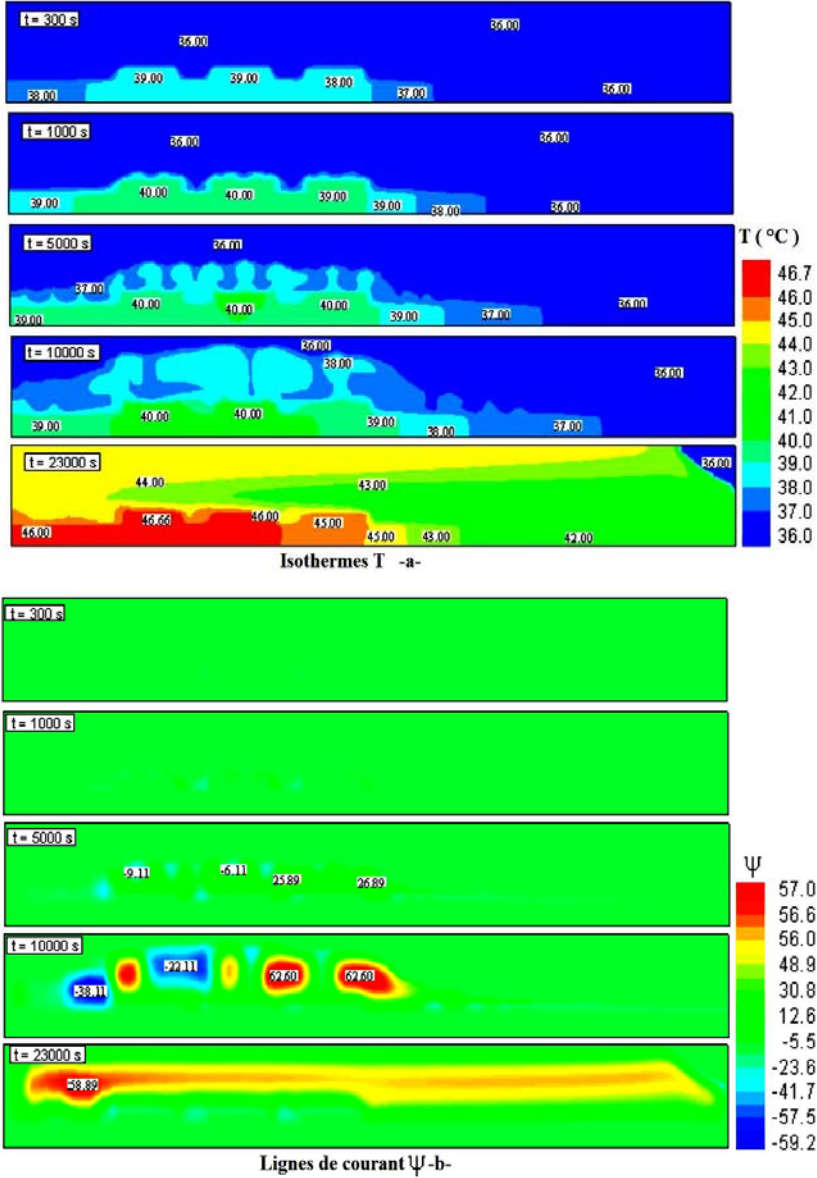


Fig. 5: Evolution temporelle des champs thermique (a) et dynamique (b).
 $Q' = 10 \text{ W/m}$ 'le front de fusion et la zone du MCP solide sont caractérisés par
 $T = T_f = 36^{\circ}\text{C}$ sur la Fig. (a)'

Une des observations qui se dégagent de l'analyse de l'évolution du nombre de Nusselt moyen des sources de chaleur (Fig. 3) est que le nombre de Nusselt, Nu , n'est pas proportionnel au rapport $1/T_{\max}$. En effet, l'analyse de l'équation (16) montre que le nombre de Nusselt moyen, Nu , est le produit de $1/T_{\max}$ et

$\int_0^\xi k_i \times (\partial T / \partial \eta) \times d\xi$. Ce dernier terme représente le flux thermique évacué par les trois faces de la source de chaleur au MCP. Au début, la température maximale et le flux de chaleur évacué par la source de chaleur s'accroissent.

Toutefois, le rapport $1 / T_{\max}$ l'emporte sur le flux de chaleur, si bien que le produit $(1 / T_{\max} \times \int_0^\xi k_i \times (\partial T / \partial \eta) \times d\xi)$ décroît avec le temps. Passé ce stade, les termes $T_{\max}$ et $\int_0^\xi k_i \times (\partial T / \partial \eta) \times d\xi$ augmentent et diminuent avec le temps, respectivement. Le même comportement est observé durant la dernière phase. C'est la raison pour laquelle le nombre de Nusselt diminue. Durant le régime quasi stationnaire, $1 / T_{\max}$ et $\int_0^\xi k_i \times (\partial T / \partial \eta) \times d\xi$ demeurent constants, entraînant, ainsi la constance du nombre de Nusselt.

Le **Tableau 4** donne le pourcentage de contribution des différentes parties de l'interface paroi chaude/MCP au transfert de chaleur vers le MCP, durant le régime quasi-stationnaire ($t = 5000$ s). Il est à noter que ces différentes valeurs restent constantes durant le régime quasi-permanent caractérisé par la stabilité relative de la température des sources de chaleur.

L'analyse du **Tableau 4** montre que la contribution des quatre portions de la plaque conductrice représente 52,46 % de la puissance générée par les sources de chaleur, alors que les sources de chaleur évacuent, directement, vers le MCP, environ 47,40 %. Ainsi, le MCP emmagasine, environ, 99,80 % de la puissance générée par les sources de chaleur. Ceci démontre clairement l'importance pratique d'utiliser les matériaux à changement de phase dans les applications de refroidissement de composants électroniques.

Tableau 4: Contribution des différentes portions de l'interface paroi chaude/MCP au transfert de chaleur vers le MCP, durant le régime quasi-permanent
 $(Q_{\text{out}} = Q(\text{sortant via plaque ou source}) / 3 Q' \times 100)$

% transfert de chaleur vers le MCP					
16,30	16,20	7,17	15,90	4,14	15,3
	S_1		S_2		S_3
Plaque conductrice					
					24,85

3.2 Analyse de l'effet du nombre de Rayleigh, Ra

Le nombre de Rayleigh représente l'intensité de la convection naturelle se manifestant dans la cavité du MCP liquide.

Dans cette étude, ce nombre varie entre $8,363 \times 10^8$ et $5,01 \times 10^9$. Sa variation résulte de celle de la puissance générée, par unité de longueur, Q' , par chaque source de chaleur ($10 \text{ W/m} \leq Q' \leq 60 \text{ W/m}$).

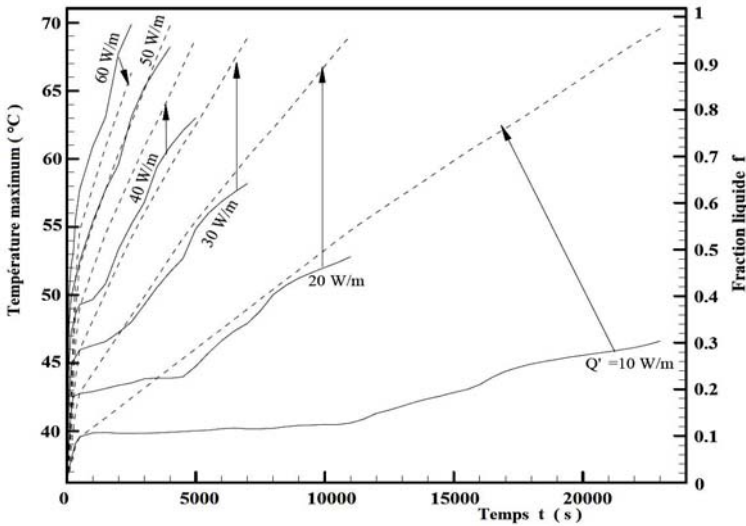


Fig. 6: Effet du nombre de Rayleigh (Puissance des sources de chaleur) sur la variation temporelle de la température maximale $T_{\max}$ (lignes continues) et de la fraction liquide f (lignes discontinues)

La Figure 6 illustre la variation temporelle de la température maximale, $T_{\max}$, pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh. Comme il peut être constaté, pour des puissances relativement faibles, $Q' \leq 40 \text{ W/m}$, l'évolution temporelle de $T_{\max}$ passe par les mêmes phases que celles décrites à la section précédente. La phase intermédiaire représente le régime quasi stationnaire de l'enceinte, durant laquelle la température maximale demeure pratiquement constante. Sa durée est d'autant plus courte que le nombre de Rayleigh est grand.

Aussi, l'analyse de cette figure montre que la température maximale enregistrée, lors du régime quasi stationnaire, est d'autant plus élevée que le nombre de Rayleigh est élevé.

Quant à l'effet de Ra sur la fraction liquide, la figure montre clairement que la durée de fusion est d'autant plus courte que Ra est élevé. On note que l'accroissement du nombre de Rayleigh entraîne une surchauffe rapide des sources de chaleur.

En pratique, il y a des situations où la puissance générée par le composant électronique est telle que la source de chaleur risque de surchauffer rapidement ($50 \text{ W/m} \leq Q'$). Pour surmonter cette difficulté, la géométrie de l'enceinte ainsi que les propriétés thermo-physiques de la plaque conductrice doivent être contrôlées de telle sorte à maximiser la durée de fonctionnement sécurisé des sources de chaleur.

La figure 7 illustre l'impact du nombre de Rayleigh sur le profil de température au sein de la plaque conductrice (milieu de la plaque conductrice: $y = X_s/2$) à l'instant $t = 3000 \text{ s}$. On remarque que les courbes sont ondulées et présentent des maximums locaux près des sources de chaleur. Il ressort, aussi, de l'examen de cette figure que la température du substrat s'accroît lorsque Ra augmente. Ceci est dû au fait que la quantité de chaleur générée par les sources de chaleur augmente avec Ra .

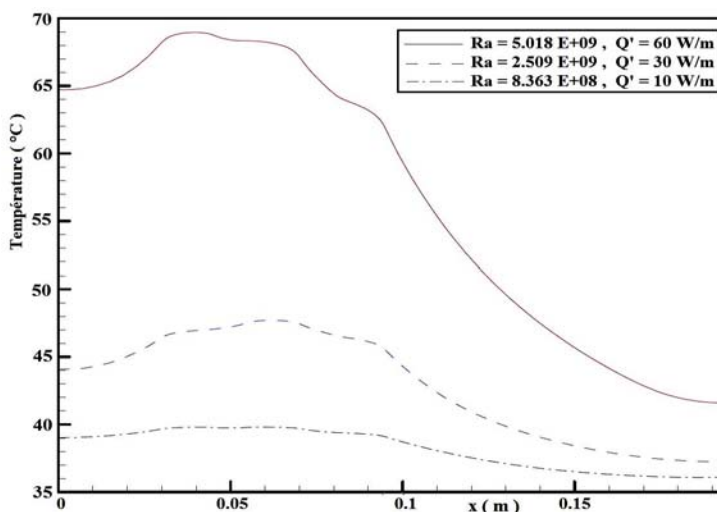


Fig. 7: Profil de température au sein du substrat ($t = 3000$ s, $y = X_s/2$)

Ainsi, pour une même durée de stockage ($t = 3000$ s), le substrat stocke plus de chaleur sensible pour les valeurs élevées de Ra . Un autre résultat qui se dégage de l'analyse de la figure 7 est que pour des valeurs relativement faibles de Rayleigh ($Q' < 30$ W/m), le gradient de température est faible en raison du transfert de chaleur conductif qui prévaut dans la couche du MCP liquide avoisinant la plaque conductrice et les sources de chaleur.

Au fur et à mesure que Rayleigh augmente, la convection naturelle s'intensifie rapidement et le profil de température devient tributaire de la structure de l'écoulement dans la phase liquide du MCP (apparition des cellules convectives de Rayleigh-Bénard au-dessus de la paroi chaude).

En effet, lorsque le nombre de Rayleigh augmente, les courants convectifs impactant les faces des sources de chaleur et du substrat chaudes forcent le liquide à extraire plus de chaleur et de la véhiculer vers les zones froides supérieures de la cavité, à proximité du front de fusion (paroi froide mobile, $T = T_f$).

On remarque aussi une montée en température dans la partie de la plaque conductrice, située au niveau des sources de chaleur. La plaque conductrice ne peut pas être considérée comme isotherme. Il est important de tenir compte des transferts thermiques par conduction dans la plaque, conjugués à la convection naturelle dans la zone liquide.

Il est à noter que la différence de température enregistrée au sein de la plaque conductrice dépasse 25 °C pour une puissance $Q' = 60$ W/m. Dans ce cas, la plaque conductrice subit de forts gradients thermiques, ce qui peut présenter un risque de fissuration de la carte mère d'un ordinateur.

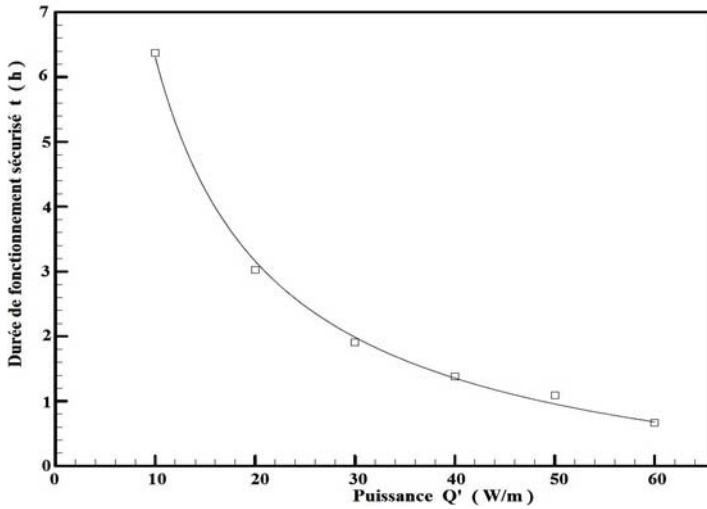


Fig. 8: Durée de fonctionnement sécurisé, t ,
en fonction de la puissance des sources de chaleur, Q'

La figure 8 donne la durée de fonctionnement sécurisé, t , en heures, en fonction de la puissance des sources de chaleur. L'analyse de cette figure montre que la durée t , diminue avec l'accroissement de la puissance des sources de chaleur, Q' . Cette figure permet de développer une corrélation donnant la durée de fonctionnement sécurisé, t , en fonction de la puissance délibérée par les sources de chaleur, Q' :

$$t = -2.37 + \frac{34.05}{Q^{0.8}} \quad (\text{avec } t, \text{ en heure et } 10 \text{ W/m} \leq Q' \leq 60 \text{ W/m})$$

Le **Tableau 5** montre un bon accord entre les résultats numériques et ceux obtenus par la corrélation {Eq. (20)}. La variation maximale pour la durée t est égale à 5,77 %. La corrélation obtenue est d'usage pratique relatif au refroidissement des composants électroniques par les MCP.

Cette corrélation permet d'estimer rapidement la puissance des sources de chaleur à partir d'une durée de fonctionnement sécurisé fixée, à l'avance, par un cahier de charge. Elle présente une importance pour la conception et le développement des dissipateurs à base de MCP.

Tableau 5: Comparaison des résultats numériques avec
ceux obtenus par la corrélation {Eq. (20)}

Q' (W/m)	t (h)	t (h)	Variation (%)
	numérique	corrélation	
10	6.24	6.34	1.58
20	3.19	3.03	4.43
30	1.97	1.91	3.41
40	1.36	1.39	2.31

50	0.98	1.05	5.77
60	0.68	0.67	1.49

4. CONCLUSION

Dans les situations où le composant électronique doit opérer dans un environnement de faibles dimensions, le refroidissement par convection forcée n'est plus pratique. La chaleur générée peut être stockée dans un réservoir rempli d'un MCP. Des simulations numériques ont été menées pour étudier l'effet de la puissance des composants électroniques sur la performance thermique d'un puits de chaleur à base de MCP.

Les résultats montrent l'existence des valeurs optimales de la puissance Q' qui maximisent la durée, t , requise par les composants électroniques pour atteindre la température critique (T_{cr}).

L'efficacité de refroidissement par les MCP dépend de la puissance Q' . Plus Q' est grand, plus la durée du régime quasi stationnaire est réduite et plus la température des composants électroniques est élevée.

Une variation très importante des gradients thermiques a été observée dans la plaque conductrice, près des composants électroniques, pour des puissances élevées. Cela peut provoquer un problème de déformation de la carte mère d'un ordinateur.

L'introduction des MCP permet de réaliser un refroidissement passif des microprocesseurs sans utiliser le ventilateur. Ceci permettra de réduire le bruit sonore et d'économiser l'énergie de la pile nécessaire pour l'autonomie des ordinateurs portables.

NOMENCLATURE

b : Constante	f : Fraction liquide
C : Constante, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$	k : Conductivité thermique, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
C_p : Chaleur spécifique, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	h : Enthalpie spécifique, J/kg
L_e : Distance entre deux sources de chaleur, m	H_c : Longueur caractéristique représentant la masse du
H_m : Hauteur de la cavité, m	$\text{MCP} = \sqrt{H_m L_m - 3 X_c L_c}$, m
L_c : Longueur de la source de chaleur, m	L_0 : Distance paroi à gauche/ 1 ^{ère} source de chaleur (S_1), m
Nu : Nombre de Nusselt moyen d'une source de chaleur	Ra : Nombre de Rayleigh =
p : Pression, Pa	$(g\beta H_c^3 3Q'/k_{m,1})/\nu_{m,1} \times \alpha_{m,1}$
t : Temps, s	Q' : Puissance générée par unité de longueur par source de chaleur, W/m
S : Terme source	T : Température, $^{\circ}\text{C}$
X_c : Epaisseur d'une source de chaleur, m	X_s : Epaisseur de la plaque conductrice (substrat), m
ρ : Densité, kg/m^3	u, v : Vitesse dans les directions x et y, m/s
α : Diffusivité thermique, m^2/s	μ : Viscosité dynamique, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$
β : Facteur d'expansion thermique, K^{-1}	

ν : Viscosité cinématique, m^2/s

ΔH_f : Chaleur latente, J/kg

ζ : Distance périphérique des sources
de chaleur, m

η : Distance normale à la surface d'une
source de chaleur, m

Ψ : Fonction de courant = $\int u \, dy - v \, dx$

S : Plaque conductrice

Indices & Exposants

f : Fusion

o : initial Liquide

l : Liquide

c : Source de chaleur;

m : Liquide, MCP

cr : Valeur critique

max : Maximal

i : Interface MCP/plaque conductrice –
source de chaleur

p : Pression constante

$S_{1,2,3}$: Source de chaleur à gauche,

ref : Vapeur de référence

centrale et à droite

REFERENCES

- [1] Y. Jaluria, 'Design and Optimization of Thermal Systems', 2nd Ed, CRC Press, Boca Raton, FL, Chap. 3, pp. 133 - 148, 2008.
- [2] A.R. Tilley and H.D. Associates, 'The Measure of Man and Women, Human Factors in Design', Revised Edition, Whitney Library of Design, Watson Guptill Publications, 2001.
- [3] V. Shanmugasundaram, J.R. Brown and K.L. Yerkes, 'Thermal Management of High Heat Flux Sources Using Phase Change Material, a Design Optimization', American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA 2451-2460, 1997.
- [4] M. Faraji and H. El Qarnia, 'Numerical Optimization of a Thermal Performance of a Phase Change Material Based Heat Sink', International Journal of Heat and Technology, Vol. 26, N°2, pp. 17 – 24, 2008.
- [5] M. Faraji et H. El Qarnia, 'Optimisation d'un Système de Stockage d'Energie par Chaleur Latente de Fusion: Application au Refroidissement d'un Composant Electronique', Journées Internationales de Thermique, JITh'2007, Vol. 2, pp. 141 – 145, Albi, France, 2007.
- [6] D. Pal, Y.K. Joshi, 'Melting in a Side Heated Tall Enclosure by a Uniformly Dissipating Heat Sources', International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 44, N°2, pp. 375 – 387, 2001.
- [7] Y. Zhang, Z. Chen and Q. Wang, 'Analysis of Melting in an Enclosure with Discrete Heating at a Constant Rate', International Journal of Heat Fluid Flow, Vol. 15, N°1, pp. 79 - 82, 1994.
- [8] Y. Ju, Z. Chen and Y. Zhou, 'Experimental Study of Melting Heat Transfer in an Enclosure with Three Discrete Protruding Heat Sources', Experimental Heat Transfer, Vol. 11, N°2, pp. 171 - 186, 1998.
- [9] B. Binet and M. Lacroix, 'Melting from Heat Sources Flush Mounted on a Conducting Vertical Wall', International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow, Vol. 10, N°3, pp. 286 – 307, 2000.
- [10] V.R. Voller, M. Cross and N.C. Markatos, 'An Enthalpy Method for Convection/Diffusion Phase Change', International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 24, N°1, pp. 271 - 284, 1987.
- [11] S.V. Patankar, 'Numerical Heat Transfer and Fluid Flow', Washington D.C. Hemisphere, 1980.
- [12] R.R. Tummala, 'Fundamentals of Micro Systems Packaging', McGraw Hill, 2001.

- [13] B. Joiner and S. Neelakantan, '*Integrated Circuit Package Types and Thermal Characteristics*', Electronics Cooling, Vol. 12, N°1, pp. 10 - 17, 2006.
- [14] F.P. Incropera, '*Liquid Cooling of Electronics Devices by Single Phase Convection*', Wiley Series in Thermal Management of Microelectronics and Electronics Systems, Wiley Interscience Publications, 1999.
- [15] E. Dorre and H. Hubner, '*Alumina: Processing, Properties and Applications*', Berlin, Germany, Springer-Verlag, Ch. 6, pp. 180 – 201, 1984.
- [16] W.R. Humphries and E.I. Griggs, '*A Design Handbook for Phase Change Thermal Control and Energy Storage Devices*', NASA Technical Paper 1074, NASA Scientific Tech. Info. Office, Hampton, VA, 1977.