

DM n°4

Système de refroidissement d'un microprocesseur

PSI 2022/2023

Les composants électroniques, comme les processeurs (CPU), les cartes graphiques (GPU) ou les chipsets chauffent de plus en plus en raison de la montée en fréquence conséquente qu'ils ont subie ces dernières années. Les industriels vantent donc les bienfaits du WaterCooling (refroidissement par écoulement d'eau) par rapport au refroidissement traditionnel par écoulement d'air.

Ce sujet à l'évacuation de la puissance thermique produite dans un processeur d'ordinateur par un système de refroidissement à eau.

A. — Rôle de la pâte thermique

Intéressons-nous tout d'abord au transport de l'énergie thermique vers le système de refroidissement. On appelle ici processeur le composant photographié figure 4 ci-dessous. C'est cette puce que l'on assimilera à un carré de surface $S = 4\text{cm}^2$ que l'on trouve dans les cartes mères des ordinateurs. La puissance thermique est essentiellement produite à l'intérieur du carré hachuré dont la surface sera appelée surface utile notée S_u . La température de cette partie du processeur est supposée uniforme.



FIGURE 1 – Photographie d'une puce AMD A6-5400 et représentation de la surface utile S_u (carré hachuré)

On néglige le transfert thermique à travers les parois latérales du processeur. On ne considère que le transfert thermique s'effectuant à travers la face supérieure du processeur. Cette dernière est en contact avec le support métallique du radiateur (refroidissement à air) ou de l'échangeur (refroidissement à eau) du système de refroidissement. À cause de leur rugosité, le contact entre les deux surfaces présente des imperfections. Cela se traduit par des poches d'air entre elles que l'on remplit lors du montage du système de refroidissement avec une pâte thermique (figure 5).

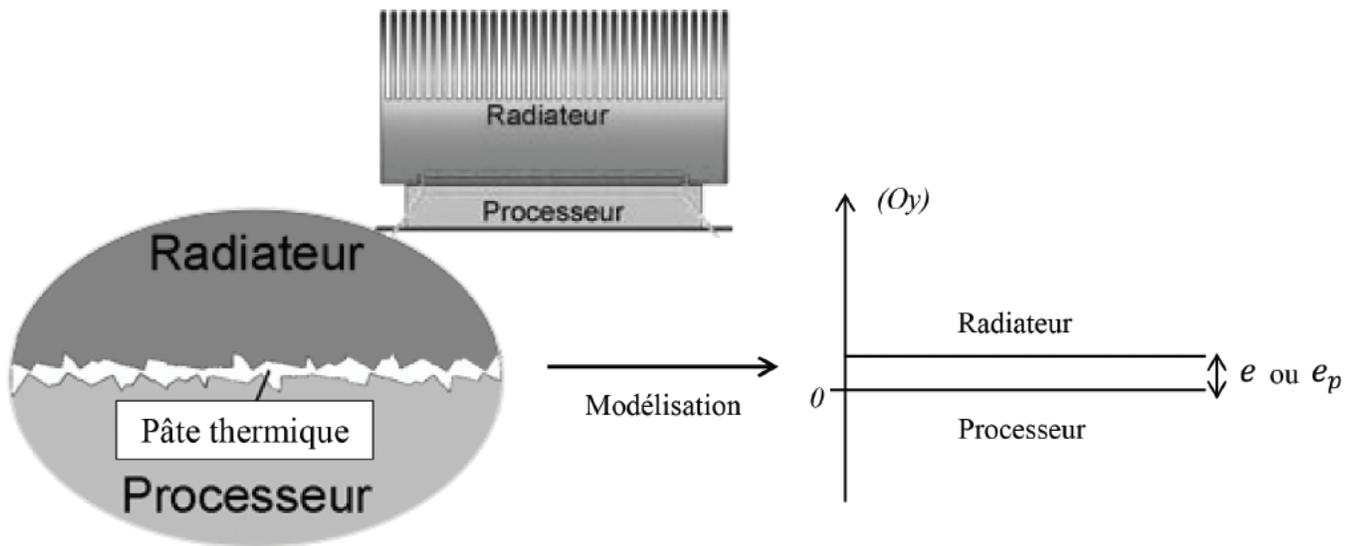


FIGURE 2 – Schématisation et modélisation de la surface de contact entre le processeur et le radiateur (ou de l'échangeur thermique).

On souhaite estimer l'impact de la rugosité sur l'efficacité du transfert thermique vers le système de refroidissement en l'absence de la pâte thermique pour en comprendre l'importance.

On modélise le système par deux milieux distants de e et de section plane S_u perpendiculaire à l'axe (O_y) . Les lacunes remplies d'air (en l'absence de pâte thermique) entre les plaques sont donc modélisées par une couche d'air d'épaisseur e constante. On se place en régime stationnaire et on note λ la conductivité thermique de l'air. Le processeur et le radiateur ont des températures uniformes respectivement notées T_p et T_r . Dans la couche d'air, la température T ne dépend que de y . On utilisera les valeurs numériques suivantes :

- conductivité thermique de l'air $\lambda_a = 0,03 \text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$,
- épaisseur de la couche d'air $e = 1 \mu\text{m}$ (taille caractéristique des reliefs d'une surface métallique sans traitements de surface)
- conductivité thermique de la pâte thermique $\lambda_p = 10 \text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$.

□ 1 — Justifier que l'on puisse négliger les effets de bord et considérer que T ne dépend que de y dans la couche d'air.

□ 2 — Rappeler la loi de Fourier. À l'aide d'un bilan d'énergie sur un système bien choisi, établir l'équation vérifiée, en régime stationnaire, par T dans la couche d'air de surface S_u .

□ 3 — En déduire l'expression de $T(y)$ puis l'expression de la résistance thermique R_a de la couche d'air.

□ 4 — Il est conseillé d'appliquer une goutte, supposée sphérique, de pâte thermique d'environ 3 mm de diamètre qui est étalée par pression lors de l'installation du radiateur. À l'aide des photographies de la figure 12, exprimer en fonction des paramètres pertinents l'épaisseur e_p de la couche de pâte thermique. Application numérique.

□ 5 — Calculer la résistance thermique R_a de la couche d'air et celle R_p de la couche de pâte thermique de surface S_p .

□ 6 — Pour un flux thermique de 100 W, estimer la différence de température $\Delta T = T_p - T_r$ entre le processeur et le radiateur avec et sans pâte thermique.

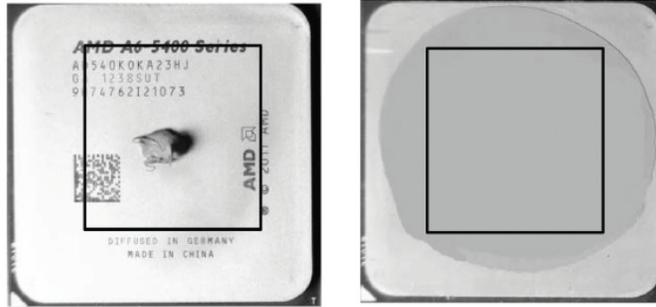


FIGURE 3 – Application de la pâte thermique

□ 7 — Proposer une autre méthode permettant de diminuer la résistance thermique du contact entre les deux plaques.

.B. — Description d'un module de watercooling

Le watercooling ou refroidissement à eau est une technique d'évacuation de la chaleur produite par les processeurs appelée ainsi par opposition à l'aircooling ou refroidissement à air. Un système de watercooling est constitué (figure 7) d'un échangeur thermique situé sur le processeur et d'un radiateur (dissipateur généralement externe) situé à l'arrière de la tour reliés par des tuyaux dans lesquels circule de l'eau. Le débit d'eau est contrôlé par une pompe. L'eau reçoit l'énergie thermique produite dans le processeur au niveau de l'échangeur avant de la céder à l'air de la pièce dans le radiateur.

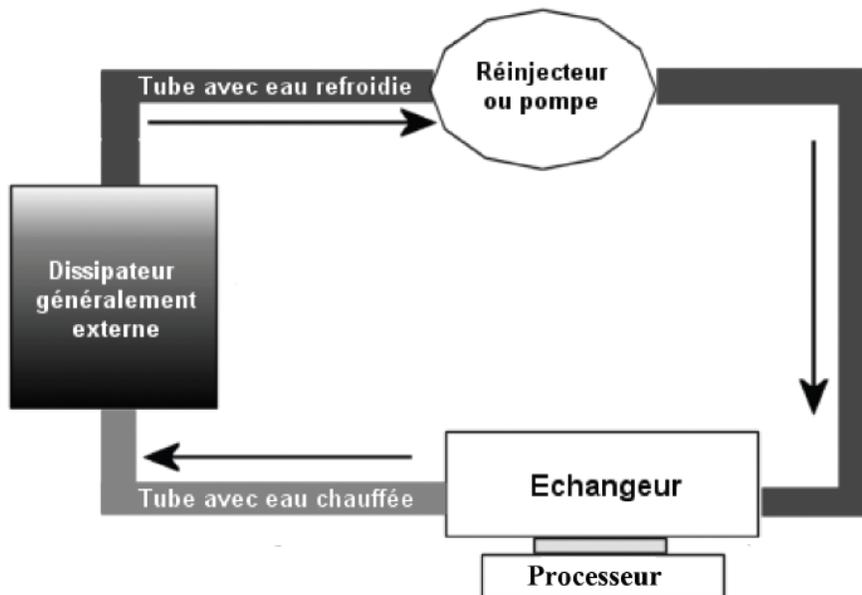


FIGURE 4 – Schématisation d'un système de watercooling

On s'intéresse ici à un échangeur thermique (figure 8) constitué d'un ensemble de micro-canaux percés dans le corps de l'échangeur et d'ailettes de refroidissement. Ces dispositifs sont fabriqués dans des métaux conduisant la chaleur. L'eau circule dans les canaux et emporte l'énergie thermique produite par le processeur.

On souhaite déterminer le champ de température dans l'échangeur en régime permanent et en particulier dans la base métallique en contact avec le processeur

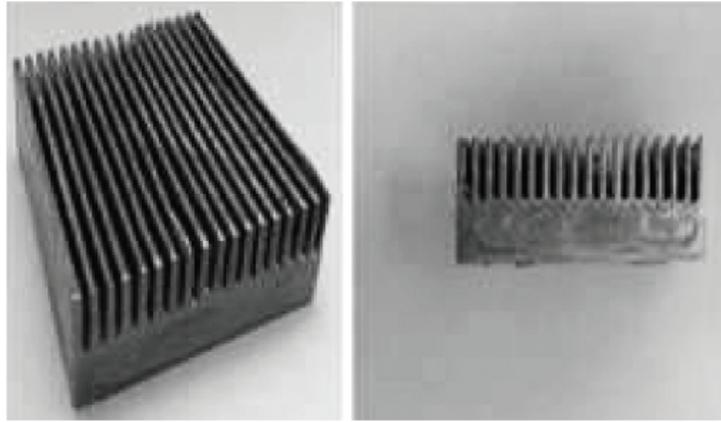


FIGURE 5 – Photographie d'un échangeur thermique à micro-canaux (sans son "couvercle")

Dans cette partie du système, l'équation vérifiée par le champ de température en régime permanent est :

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = 0$$

Le problème est toujours supposé invariant selon l'axe (Oz). Pour illustrer le principe de la méthode, l'ailette est modélisé par un rectangle. Considérons le rectangle figure 11 dont trois côtés sont à la température T_1 et le dernier à la température T_2 . Ce rectangle est découpé en 8 petits carrés de côté h (appelé pas de discrétisation) dont les sommets forment un réseau de points de coordonnées (i_h, j_h) auxquels correspondent les températures $T(i_h, j_h)$ que l'on mémorise dans un tableau $T(i, j)$. L'objectif est de déterminer les températures $T(1, 1)$, $T(1, 2)$ et $T(1, 3)$ aux points de coordonnées (h, h) , $(h, 2h)$ et $(h, 3h)$.

La méthode des différences finies centrées avec le pas de h est utilisée pour déterminer le champ de température dans l'échangeur et en particulier dans la base métallique en contact avec le processeur.

$$\frac{\partial T}{\partial x}(x, y) \cong \frac{T_{(x+\frac{h}{2}, y)} - T_{(x-\frac{h}{2}, y)}}{h}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y}(x, y) \cong \frac{T_{(x, y+\frac{h}{2})} - T_{(x, y-\frac{h}{2})}}{h}$$

□ 8 — Selon une logique analogue, expliquer comment approcher $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x, y)$ et $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}(x, y)$, d'abord à partir des dérivées premières de $T(x, y)$, puis sans aucune dérivée. Les expressions finales pourront faire intervenir $T(x+h, y)$, $T(x-h, y)$, $T(x, y+h)$, $T(x, y-h)$ et $T(x, y)$.

□ 9 — En déduire les coefficients a, b, c, d et e de l'équation différentielle sous forme discrétisée suivante :

$$aT_{(i-1, j)} + bT_{(i+1, j)} + cT_{(i, j-1)} + dT_{(i, j+1)} + eT_{(i, j)} = 0$$

□ 10 — Écrire les équations pour $i = 1, j = 1$, pour $i = 1, j = 2$ et pour $i = 1, j = 3$.

□ 11 — En déduire le système d'équations à résoudre, le mettre sous forme de deux matrices A et B tel que :

$$A.T = B$$

$$T = \begin{bmatrix} T_{(1,1)} \\ T_{(2,2)} \\ T_{(3,3)} \end{bmatrix}$$

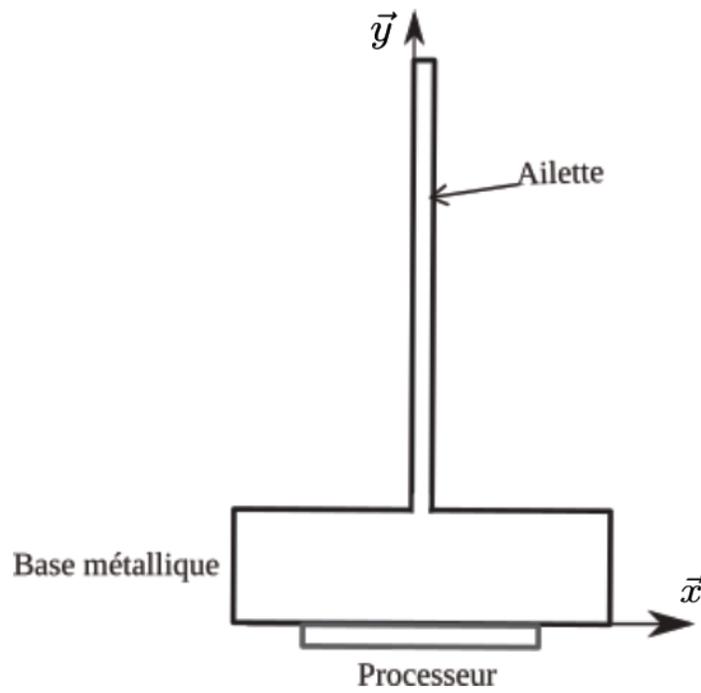


FIGURE 6 – Schématisation de l'échangeur et d'une ailette de refroidissement

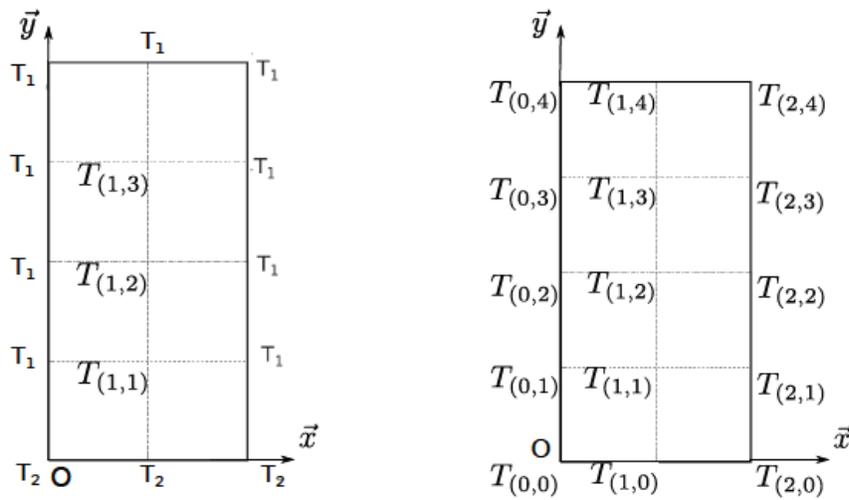


FIGURE 7 – Discrétisation de l'ailette