Refroidissement passif par matériau à changement de phase :

Optimisation de la fraction de matrice conductrice.

Motivation :

Après avoir observé un circuit imprimé sur lequel se trouvait un circuit intégré couplé à un refroidissement passif (bloc AILETTE en aluminium + pâte thermique). Je me suis posé la question suivante : quelles sont les autres solutions de refroidissement passif possible donc le fonctionnement de base diffère de ce dernier, les MCP ont retenu mon attention car il s'agit du moins commun et du plus atypique dans sa structure mais également dans son fonctionnement.

Ancrage au thème :

Le MCP retarde passivement l'échauffement d'une source de chaleur sans refroidissement actif. L'efficacité se mesure par le temps gagné avant une température critique rapportée à la masse de matière employée, l'optimisation porte sur la fraction de matrice conductrice, dont l'influence est prédite par un modèle numérique, confrontée à l'expérience

L'optimisation est la notion dominante, l'efficacité sert d'indicateur et la sobriété reste implicite (dispositif passif).

Positionnement thématique :

1) Physique : (thermodynamique et transferts thermiques)
2) SI
3) Informatique (simulation numérique, programme python)

Mots clés :

FR / ENG

MCP matériaux à changement de phase / PCM Phase change material

Chaleur latente / Latent heat

Méthode enthalpique / Enthalpy method

Refroidissement passif / Passive cooling

Optimisation / Optimization

Bibliographie commentée :

Les études expérimentales montrent que le temps gagné dépend de la puissance dissipée, de la température de fusion choisie par rapport à la température critique et de la quantité de MCP [2, 4]. Une fois le MCP entièrement fondu, il ne stocke plus que de la chaleur sensible : le dispositif retarde l'échauffement sans le supprimer, ce qui le destine surtout aux charges intermittentes [3]. La principale limite des paraffines est leur faible conductivité thermique (de l'ordre de 0,2 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$), qui concentre la fusion près de la source.

Pour l'augmenter, la littérature propose des ailettes [7], des mousses métalliques [5], du graphite expansé ou des nanoparticules. Ces insertions améliorent le transfert, mais remplacent une partie du MCP et réduisent donc l'énergie latente stockable ; la convection naturelle dans le liquide est aussi atténuée dans une mousse [5]. L'effet d'une insertion n'est donc pas monotone, et la fraction optimale dépend de la géométrie et du flux.

Côté modélisation, la méthode enthalpique sur grille fixe traite la zone de fusion sans suivre explicitement le front [6]. Elle se vérifie sur des solutions analytiques du problème de Stefan, notamment celle de Neumann [8]. Les modèles unidimensionnels négligent la convection dans le liquide, ce qui introduit un écart avec l'expérience à discuter.

Positionnement. Les travaux cités optimisent souvent des configurations par simulation ou par comparaison d'essais, avec de nombreux paramètres ajustés. Ce TIPE se limite à un facteur, la fraction volumique ε de cuivre, sur un banc à puissance électrique mesurée. Le modèle est vérifié sur des solutions connues, ne laisse qu'un paramètre libre (la tortuosité de la matrice), est calibré sur un essai puis testé sur d'autres. Une estimation analytique prévoit l'ordre de grandeur de ε optimal par la condition que la fusion s'achève au moment où la température critique est atteinte ; le TIPE teste si le modèle numérique et l'expérience la confirment, y compris si la courbe obtenue est un palier plutôt qu'un maximum net.

Problématique :

À volume fixé, existe-t-il une fraction de matrice conductrice qui optimise le temps gagné avant la température critique grâce à un MCP retardant l'échauffement d'une source de chaleur à puissance constante, et un modèle enthalpique 1D, vérifié puis calibré sur un seul paramètre, permet-il de la prévoir ?

Objectifs du TIPE :

1. Construire un modèle enthalpique 1D (bloc d'aluminium couplé à la paraffine), le vérifier sur des solutions analytiques (conduction pure, fusion de Neumann), par bilan d'énergie et par convergence en maillage.

2. Réaliser un banc à puissance électrique mesurée avec deux thermocouples (interface, surface) et étalonner la chaîne de mesure.

3. Mesurer le temps avant température critique pour la paraffine seule, puis avec trois fractions de matrice de cuivre.

4. Calibrer un seul paramètre (tortuosité) sur un essai, valider sur les autres.

5. Comparer modèle, solution analytique et expérience ; discuter les écarts au regard des incertitudes.

Références bibliographiques :

[1] Alawadhi E. M., Amon C. H., « PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies », *IEEE Trans. Components Packaging Technol.*, 26(1), 2003.

[2] Tan F. L., Tso C. P., « Cooling of mobile electronic devices using phase change materials », *Applied Thermal Engineering*, 24, 2004.

[3] Kandasamy R., Wang X.-Q., Mujumdar A. S., « Application of phase change materials in thermal management of electronics », *Applied Thermal Engineering*, 27, 2007.

[4] Kandasamy R., Wang X.-Q., Mujumdar A. S., « Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-based heat sinks », *Applied Thermal Engineering*, 28, 2008.

[5] Zhao C. Y., Lu W., Tian Y., « Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs) », *Solar Energy*, 84, 2010.

[6] Voller V. R., Prakash C., « A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems », *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30, 1987.

[7] Fok S. C., Shen W., Tan F. L., « Cooling of portable hand-held electronic devices using phase change materials in finned heat sinks », *Int. J. Thermal Sciences*, 49, 2010.

[8] Alexiades V., Solomon A. D., *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*, Hemisphere, 1993.