

Solutions d'actionnement pour méthodes actives de refroidissement des systèmes embarqués

Julien Michel FONTAINE^{1,2*}, François PIGACHE^{1,2}, Marc MISCEVIC^{3,4}, Frédéric TOPIN⁵, Jean-François ROUCHON^{1,2}

¹ Université de Toulouse ; INP, UPS ; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie) ; ENSEEIHT, 2 rue Charles Camichel, F-31071 Toulouse, France.

² CNRS ; LAPLACE ; F-31071 Toulouse, France.

³ Université de Toulouse ; UPS, INP ; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie) ; 118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse , France.

⁴ CNRS ; LAPLACE ; F-31062 Toulouse, France.

⁵ Laboratoire IUSTI, Aix-Marseille Université-CNRS
5 rue Enrico Fermi, Marseille 13453, France

*(auteur correspondant : fontaine@laplace.univ-tlse.fr)

Résumé - Dans cet article sont étudiées des solutions en vue de la déformation contrôlée d'une membrane pour une application de refroidissement en électronique embarquée. Dans un premier temps les caractéristiques de l'actionneur sont définies. Ensuite différents types d'actionnement sont détaillés et comparés : par action thermique, mouvement de fluide, polymère électroactif, électrostatique, magnétique et piézo-électrique.

Nomenclature

Q débit, mL/min

P puissance thermique, W

c_p capacité calorifique massique, J/K/kg

ΔT différence de température, K

v_{onde} vitesse de propagation de l'onde, m/s

S Section de passage du canal, m²

f fréquence, Hz

e épaisseur total du canal, m

L longueur du canal, m

Symboles grecs

λ longueur d'onde, m

ρ masse volumique, kg/m³

1. Introduction

Assurer le refroidissement des systèmes électroniques embarqués tout en satisfaisant aux contraintes de fiabilité, de performances et d'encombrement reste aujourd'hui plus que jamais d'actualité. La miniaturisation et l'augmentation des puissances de calcul de ces dispositifs conduisent à des densités de puissance toujours croissantes. Par exemple, les procédés de fabrication des microprocesseurs atteignent une limite technique dans la finesse de gravure (aujourd'hui de l'ordre de la dizaine de nanomètres) si bien que l'amélioration des performances passe nécessairement par l'augmentation de la fréquence. Cette montée en fréquence engendre des pertes et un échauffement supplémentaires. De plus la fiabilité, la durée de vie et la consommation d'énergie de ces composants sont directement liées à la température. C'est pour ces raisons qu'au delà d'assurer un refroidissement efficace, il est nécessaire de contrôler précisément la température.

Parmi les nombreuses solutions de refroidissement se démarque la solution active décrite dans l'article de Léal et al. [1]. Cette solution utilise la déformation dynamique d'une paroi d'un canal à fluide calo-porteur de sorte à pomper un liquide et assurer un échange thermique efficace

à l'interface solide/fluide. Le principe consiste à disposer le canal directement au dessus de la surface à refroidir et de déformer de façon péristaltique la paroi opposée (voir figure 1). La variation dynamique des dimensions de canal permettent un champ de vitesse du fluide favorable à l'amélioration des transferts thermiques (voir figure 2).

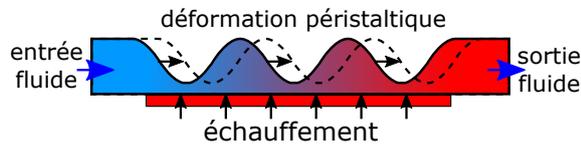


Figure 1 : Schéma de principe

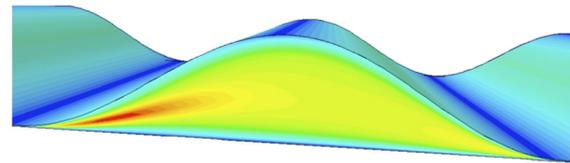


Figure 2 : Tracé de l'amplitude du vecteur vitesse du liquide [1]

D'après les premiers résultats numériques [1], une nette amélioration du coefficient de transfert thermique est atteignable lorsque la paroi se déforme d'une amplitude supérieure à 90% de l'épaisseur du canal (voir figure 3). Ainsi il apparait possible de contrôler indépendamment le transfert thermique et le débit du liquide à partir de la fréquence et de l'amplitude de déformation et par conséquent de contrôler précisément la température de la source chaude (voir figure 4).

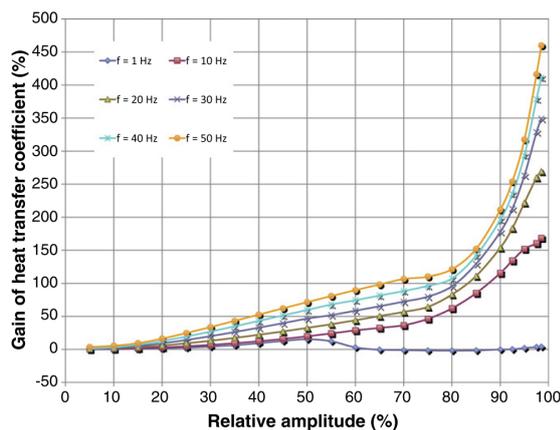


Figure 3 : Gain en coefficient de transfert de chaleur en fonction de l'amplitude relative de déformation et de la fréquence [1]

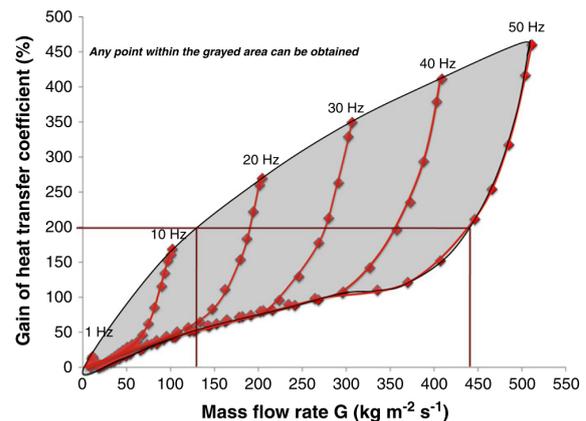


Figure 4 : Gain et débit, contrôle indépendant par fréquence et amplitude [1]

Les premières investigations expérimentales [2] [3] confirment l'aptitude d'un tel dispositif à améliorer les transferts de chaleur. Dans ces essais de laboratoire, la paroi est déformée à l'aide de dix actionneurs piézoélectriques disposés tout au long du canal d'une longueur totale de 10cm. A cette étape de validation, l'encombrement des actionneurs ne constitue pas une difficulté mais s'avèrera finalement cruciale pour permettre l'intégration de cette solution au sein de systèmes électroniques embarqués. L'étape suivante consiste donc à améliorer l'actionnement. C'est dans ce contexte qu'est réalisée une étude comparative des solutions d'actionnement pour la déformation de membrane. Le problème est d'abord détaillé du point de vue de l'actionnement en considérant les contraintes liées à l'électronique embarquée et l'utilisation de cette solution active de refroidissement. Différentes solutions technologiques sont finalement identifiées.

2. Description des caractéristiques de l'actionnement

Parmi les conditions à satisfaire pour l'électronique embarquée, l'encombrement, la puissance massique, la fiabilité, la durée de vie, la gamme opérationnelle de température constituent les principales contraintes.

- Dans le but d'équiper des microprocesseurs, il apparait raisonnable de viser des dimensions comparables à celles du composant, tout en conservant une faible hauteur, soit environ $40\text{mm} \times 40\text{mm} \times 20\text{mm}$, incluant l'alimentation électrique.
- Pour limiter ou éviter les opérations de maintenance, le dispositif doit être fiable et avoir une durée de vie au-delà de 10 ans en fonctionnement continu nominal.
- En outre, le système étant isolé, la consommation électrique du système de refroidissement doit être minimale. Idéalement cette consommation ne doit pas dépasser les gains d'énergie obtenus sur le composant régulé en température.
- Les variations de température en environnement sévère impose l'utilisation de liquide résistant au gel et à l'évaporation, aux propriétés thermiques moindres que celles de l'eau (capacité calorifique massique et masse volumique). Ce choix se traduit par la nécessité d'augmenter le débit (à refroidissement équivalent) et donc essentiellement par une augmentation de la fréquence de l'actionnement.

Le but est donc de déformer une paroi, plus précisément de créer une onde progressive large, sur une courte distance et dans un milieu fini. L'amplitude de l'onde doit atteindre des déplacements de plusieurs centaines de micromètres. La difficulté technique est réelle en raison des critères antagonistes que sont une grande amplitude de déformation au sein d'un domaine fini de quelques centimètres. En outre pour les besoins de commandabilité, l'onde générée doit être réglable indépendamment en fréquence et en amplitude.

Le débit est évaluable à partir de la puissance thermique à dissiper (cinquantaine de Watt), de la différence de température en entrée/sortie du dispositif (dizaine de Kelvin) et des propriétés du liquide utilisé (e.g. coolanol) (1). À partir de ce débit, des dimensions du canal et les caractéristiques de l'onde progressive, il est possible d'évaluer la vitesse des déplacements verticaux de l'actionneur (2).

$$Q = \frac{P}{\rho c_p \Delta T} \approx 200 \text{ mL/min} \quad (1)$$

$$Q = S * v_{\text{onde}} = \frac{eL}{2} * \lambda f \quad (2)$$

Cette vitesse est fonction de la hauteur moyenne du canal et de la fréquence, un compromis est à trouver entre amplitude de déformation (au moins 90% de l'épaisseur du canal) et fréquence d'excitation de l'actionnement.

À titre d'exemple pour une longueur d'onde de 1cm , des déformations de quelques centaines de μm , la fréquence est de quelques dizaines de Hz (3). Ce qui représente environ 10000ppm de déformation relativement à la hauteur disponible.

$$v_{\text{actionneur}} = 2ef = \frac{4Q}{\lambda L} \approx 0.04 \text{ m/s} \quad (3)$$

Outre l'aptitude de course des actionneurs, le choix d'une technologie nécessitera d'évaluer les efforts mécaniques à fournir. Ces forces dépendent conjointement des pressions fluides à vaincre et du matériau de la paroi à déformer. Idéalement les pressions sont liées aux pertes de charge dans l'ensemble du circuit de refroidissement (la puissance hydraulique) et dans le contexte de cette étude elle ne représente que quelques dizaines de mW avec le débit calculé précédemment. S'ajoute à cela la puissance mécanique requise pour déformer la paroi. Les propriétés de cette membrane (module d'Young, épaisseur) définissent la puissance nécessaire. Toutefois ces valeurs sont théoriques et supposent que l'onde progressive soit parfaite. Dans le cas contraire, la fermeture du canal provoque des variations locales de pressions, pouvant être non négligeables. Par conséquent le choix d'une technologie d'actionnement requiert préalablement l'évaluation de ces pressions. Les études préliminaires permettent d'évaluer ces pressions de l'ordre de $0.1MPa$.

3. Étude des solutions d'actionnement envisageables

Dans cette section sont étudiées différentes solutions d'actionnement pouvant *a priori* répondre au besoin détaillé précédemment. Ces solutions sont envisagées au regard des études expérimentales dont elles ont fait l'objet pour des besoins de micro-pompage dont les dimensions sont par définition compatibles avec le besoin visé.

3.1. Actionnement par effet thermique

La variation de volume d'un gaz en fonction de sa température ou la pression engendrée par l'évaporation d'un fluide secondaire peuvent être utilisées pour faire vibrer une paroi [4] [5]. L'exploitation de la différence de dilatation d'un bimorphe constitué de deux métaux peut également permettre la création d'une action mécanique [6].

Certains matériaux tels que les alliages à mémoire de forme (AMF) (dont le plus courant est le Nitinol) sont capables de produire de larges déplacements (jusqu'à 5% de déformation relative) et de grands efforts mécaniques. Le changement d'état réversible de sa structure austénite à martensite permet, sous certaines conditions de mise en œuvre, de passer d'une forme à une autre. Ce changement d'état est obtenu par la variation de température, le plus souvent à l'aide d'un courant électrique et de l'effet joule résultant.

L'inconvénient principal de ces solutions réside dans la dynamique lente du processus thermique à l'œuvre. A titre d'exemple, la micro-pompe à AMF [7] présente typiquement une limitation proche de $1Hz$.

3.2. Actionnement par mise en mouvement de fluide secondaire

L'électrohydrodynamique (EHD), la magnétohydrodynamique (MHD) et l'électromouillage (EM) permettent de mettre en mouvement un liquide. Normalement utilisées pour le pompage, ces solutions peuvent permettre de déformer la paroi indirectement par l'intermédiaire d'un fluide secondaire.

La mise en œuvre de telles solutions dans un espace centimétrique pour produire une déformation péristaltique est difficile. L'article [8] présente une micro-pompe à actionnement par EM. Les performances de cette pompe se dégradent avec la fréquence, la déflexion produite est de $13\mu m$ à $1Hz$ et $1\mu m$ à $100Hz$. Le débit maximum est atteint à environ $25Hz$. La fréquence et l'amplitude sont donc fortement liées, ce qui ne permettrait pas une exploitation complète pour la solution active proposée. De plus l'amplitude n'est pas suffisante en raison de forces développées trop faibles.

3.3. Actionnement à polymère électroactif ionique

Les polymères électroactifs ioniques (Nafion, Flemion) sont des matériaux qui se déforment lorsqu'ils sont soumis à une tension électrique. L'avantage de ces polymères est leur grande déformation pouvant atteindre plusieurs centimètres (10%) sous une tension de seulement quelques Volt.

Les inconvénients sont principalement le faible temps de réponse dû à la migration lente des ions dans le polymère ainsi que les faibles forces mécaniques obtenues.

Cette technologie mise en œuvre dans [9] développe des forces de l'ordre du milli-Newton pour des fréquences n'excédant pas quelques Hz , et est par conséquent incompatible avec l'objectif visé.

3.4. Actionnement électrostatique

L'actionnement électrostatique exploite les forces de Coulomb [10]. Un mouvement est obtenu par attraction de deux électrodes chargées par une différence de potentiel électrique. Le courant ne circulant pas, cet actionnement est à très basse consommation d'énergie. De plus la taille de l'actionneur se résume à l'épaisseur des électrodes et de l'espace inter-électrode (hors alimentation).

L'inconvénient de cette solution est la faible force et amplitude de déformation. Il existe également une zone d'action qui, au-delà d'une valeur seuil, conduit au collage des électrodes. Cela rend le contrôle de la déformation impossible dans cette zone.

3.5. Actionnement magnétique

De nombreux moyens de mise en œuvre font appel à l'actionnement magnétique. Le faible coût et la petite taille des mini-moteurs électriques permettent de nos jours d'imaginer divers configurations mécaniques pour déformer une paroi, soit à partir d'un simple axe de rotation, soit suivant des configurations plus complexes. Un avantage de ces actionnements magnétiques est leur rapide temps de réponse.

Les champs magnétiques peuvent être créés soit par un courant parcourant une bobine (électroaimant) soit en utilisant des aimants permanents. L'avantage des aimants permanents est leur fort champ magnétique, au delà de $1T$ pour les aimants de type NdFeB. À volume égal, les bobines créent des champs magnétiques d'intensité environ 1000 fois plus faible auxquels s'ajoutent des pertes par effet Joule dues au fort courant électrique. En revanche un électroaimant offre une plus grande souplesse de contrôle. Une actionnement possible consiste donc à déplacer un aimant permanent dans une bobine par interaction de champs magnétique [11].

Une autre solution consisterait à employer des matériaux magnétostrictifs capables de se déformer sous l'effet d'un champ magnétique. En particulier le Terfenol-D peut atteindre 4000ppm de déformation en statique et des pressions de l'ordre de la centaine de MPa . En dépit de performances mécaniques remarquables, l'inconvénient majeur de cette solution est la nécessité d'un champ magnétique variable et donc d'un électroaimant difficilement intégrable.

Un nouveau type d'actionnement magnétique est développé, utilisant une interaction de champs magnétiques entre aimants permanents [13]. Le principe repose simplement sur l'utilisation d'un arbre à cames magnétique : des aimants permanents sont disposés sur un arbre mis en rotation par un mini-moteur électrique et viennent interagir avec d'autres aimants fixés sur la paroi à déformer. Les principaux inconvénients de cette solution d'arbre à cames magnétique pour notre application sont sa difficile mise en œuvre en vue de déformer une paroi carrée et l'encombrement du mini-moteur électrique. Malgré la hausse des prix des terres rares ces solu-

tions restent relativement peu coûteuses et attractives.

3.6. Actionnement piézoélectrique

Les matériaux piézoélectriques sont des matériaux à structures cristallines non centrosymétriques ayant la propriété de se déformer sous l'effet d'un champ électrique. Des déformations jusqu'à 2000ppm peuvent être obtenues en statique. Ce déplacement peut être encore augmenté en tirant profit de la résonance mécanique de la structure. Ces matériaux présentent une excellente capacité d'intégration et sont couramment employés comme solution au micro-actionnement. D'autre part, il est souvent fait appel à un moyen d'amplification mécanique (type bras de levier [16] ou corps d'épreuve déformable...) afin d'accroître le déplacement au détriment de la force. Par exemple la flexion d'un disque piézo-électrique est couramment utilisée dans les micro-pompes à diaphragme[15], qui possèdent ainsi une forte intégration (voir figure 5).

Une onde peut également être propagée par excitation de mode résonnant de la structure mécanique [17] [18] [19]. L'inconvénient de cette solution est la faible amplitude de l'onde due à l'amortissement (bords fixes). De plus l'excitation de modes particuliers impose la fréquence qui est un degré de liberté dans notre cas.

A titre d'exemple, la solution retenue pour la preuve du concept de refroidissement actif a été la solution piézo-électrique associée à une amplification mécanique (voir figure 5). Cet actionneur permet d'avoir une dynamique rapide et de fournir des forces importantes malgré l'amplification. Mais l'amplification s'est faite au détriment de l'encombrement.



Figure 5 : Actionneur piézoélectrique amplifié de Amokrane et al. [2] (20cm de long)

4. Conclusion

La figure 6 permet une comparaison objective des nombreuses technologies envisagées dans cet article. Il ressort de cette comparaison que l'objectif visé est atteignable mais que la difficulté est d'avoir toutes les performances à la fois avec une même technologie. Au regard de différentes contraintes qu'imposent les systèmes électroniques embarqués et la solution active de refroidissement retenue, seules les technologies magnétiques et piézoélectriques offrent des performances dynamiques et de puissances massiques satisfaisantes.

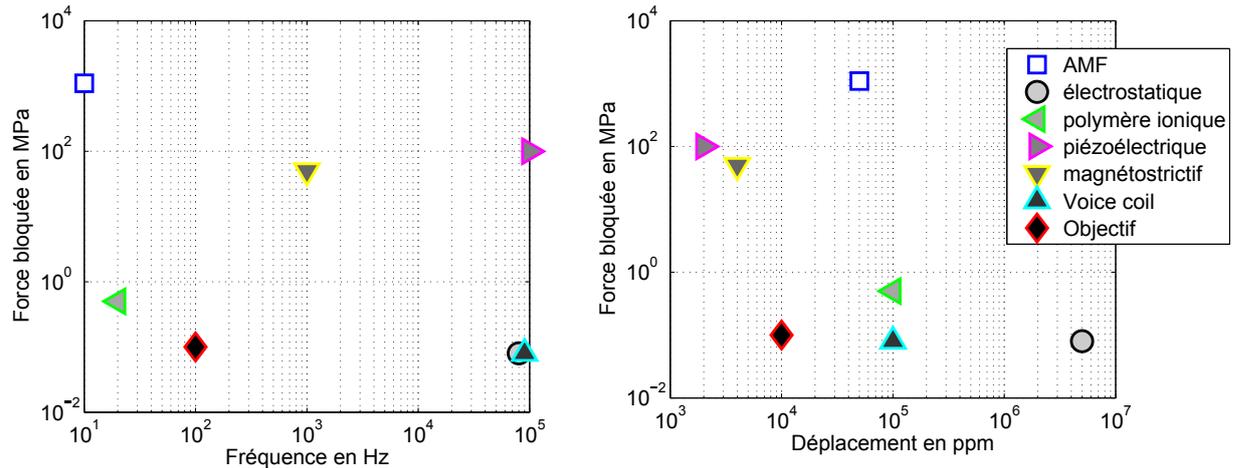


Figure 6 : Comparaison des actionnements seuls (sans mise en œuvre) [20]

Références

- [1] L. Léal et al., Simultaneous integration, control and enhancement of both fluid flow and heat transfer in small scale heat exchangers : A numerical study, *Int. Com. in Heat and Mass Transfer*, 49 (2013) 36-40.
- [2] M. Amokrane et al., Multicellular piezoelectric actuator for setting in motion fluids, and heat exchange enhancement, *IEEE 11th ECMSM*, (2013)
- [3] J. Hamze et al., Intensification des transferts par morphing de paroi, *Congrès Français de Thermique*, (2016)
- [4] O. C. Jeong et al., Fabrication and test of a thermopneumatic micropump with a corrugated p+ diaphragme, *Sensors and Actuators*, 83 (2000) 249-255
- [5] W. Y. Sim et al., A phase-change type micropump with aluminium flap valves, *J. Micromech, Microeng*, 13 (2003) 286-294
- [6] Q. Zou et al., A study on micromachined bimetallic actuation, *Sensors and Actuators*, 78 (1999) 212-219
- [7] W.L. Benard et al., Thin-film shape-memory alloy actuated micropumps , *Journal of Microelectromechanical systems*, vol. 7, no. 2 (1998)
- [8] K.-S. Yun et al., A surface-tension driven micropump for low-voltage and low-power operations, *Journal of Microelectromechanical systems*, vol.11, no. 5 (2002)
- [9] S. Guo et al., Polymer-based new type of micropump for bio-medical application, *International conference on robotics and automation*, 1830-1835 (2003)
- [10] R. Zengerle et al., A bidirectional silicon micropump, *Sensors and Actuators A*, 50 (1995) 81-86
- [11] C. Yamahata et al., Glass valveless micropump using electromagnetic actuation, *Microelectronic Engineering*, 78-79 (2005) 132-137
- [12] S. Böhm et al., A plastic micropump constructed with conventional techniques and materials, *Sensors and Actuators*, 77 (1999) 223-228
- [13] M. Shen et al., Magnetic active-valve micropump actuated by a rotating magnetic assembly, *Sensors and Actuators B*, 154 (2011) 52-58
- [14] W. Ye et al., Travelling wave magnetic valveless micropump driven by rotating integrated magnetic arrays, *Micro and Nano Letters*, Vol. 9, Iss. 4 (2014) 232-234
- [15] I.H. Hwang et al., Flow characterization of valveless micropump using driving equivalent moment : theory and experiments, *Microfluid Nanofluid*, 5 (2008) 795-807
- [16] W. Zhang et al., Travelling-wave piezoelectric micropump with low resistance microchannel, *Electronics letters*, Vol. 47 No. 19 (2011)
- [17] J. Ogawa et al., Development of liquid pumping devices using vibrating microchannel walls, *Sensors and Actuators A*, 152 (2009) 211-218
- [18] C. Hernandez et al., Design and Manufacturing of a piezoelectric traveling-wave pumping device, *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics and frequency control*, Vol. 60, No.9 (2013)

- [19] K. Nakahara et al., A peristaltic micropump using traveling waves on a polymer membrane, *J. Micromech. Microeng.*, 23 (2013) 085024
- [20] Sofiane Soulimane, Conception et modélisation d'un micro-actionneur à base d'élastomère diélectrique, Thèse, doctorat de l'université de Toulouse (2010)

Remerciements

Ces travaux ont été soutenus par le Fond Unique Interministériel (FUI).