



HAL
open science

Etude d'un système de refroidissement de composants électroniques de puissance par métal liquide

Mansour Tawk, Yvan Avenas, Afef Kedous-Lebouc, David Charalampous, Emanuelle Dubois, Jean Chevalet

► To cite this version:

Mansour Tawk, Yvan Avenas, Afef Kedous-Lebouc, David Charalampous, Emanuelle Dubois, et al.. Etude d'un système de refroidissement de composants électroniques de puissance par métal liquide. 13ème édition de la Conférence "Électronique de Puissance du Futur" (EPF), Jun 2010, Saint-Nazaire, France. hal-00504673

HAL Id: hal-00504673

<https://hal.science/hal-00504673>

Submitted on 21 Jul 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude d'un système de refroidissement de composants électroniques de puissance par métal liquide

M. Tawk¹, Y. Avenas¹, A. Lebouc¹, D. Charalampous², E. Dubois², J. Chevalet²

¹Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab) – Grenoble Universités

²Physicochimie des Electrolytes, Colloïdes et Sciences Analytiques (PECSA) – Université Pierre et Marie Curie (Paris VI)

Résumé: Avec l'augmentation continue de la puissance dissipée par les composants et les systèmes électroniques, le marché de l'électronique de puissance a besoin de nouvelles techniques de refroidissement plus robustes et plus fiables. Les techniques de refroidissement standards utilisées aujourd'hui sont parfois insuffisantes à cause des propriétés physiques des fluides caloporteurs et plus particulièrement à cause de leur faible conductivité thermique. D'où la nécessité de faire circuler un fluide dont les propriétés thermiques sont plus élevées. Nous proposons, dans cet article, d'étudier le refroidissement des composants électroniques de puissance avec un fluide métallique (alliage de Gallium). Nous présentons dans la première partie les systèmes de pompage existants ainsi que les avantages et inconvénients d'utiliser un fluide métallique. Ensuite, nous présentons l'étude et la réalisation expérimentale d'une boucle de test. Les résultats obtenus expérimentalement sont comparés à ceux obtenus par simulation numérique du refroidisseur (logiciel Flotherm). Enfin, nous présentons la potentialité des boucles de refroidissement par métal liquide.

I. INTRODUCTION

Les composants actifs de puissance tels que les IGBT ont une température maximale de fonctionnement qui varie en fonction de la technologie employée, mais qui, en général, se situe autour de 150°C. Il s'en suit que le courant maximal, admissible en régime permanent, est en général non limité par les caractéristiques électriques et physiques intrinsèques aux composants mais plutôt par leur environnement et, en particulier, par leur système de refroidissement. Ainsi, s'il est efficacement refroidi, un IGBT peut sans problème dissiper des flux de chaleur de plusieurs centaines de Watt par centimètre carré. Dans la plupart des cas, il est illusoire de vouloir évacuer de tels niveaux de densité de flux de chaleur avec, en prime, des valeurs de pertes totales souvent de plusieurs centaines de W avec de simples dissipateurs à air. Pour cela, il est possible d'utiliser un liquide caloporteur qui prélève la chaleur au niveau du composant de puissance et qui la redistribue dans un dissipateur ayant une grande surface d'échange avec l'air (figure 1).

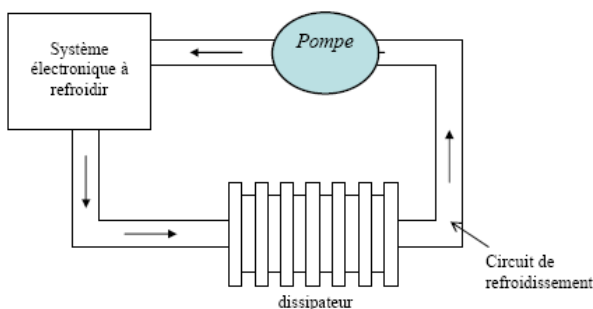


Figure 1 : Principe d'un système de refroidissement avec fluide caloporteur intermédiaire

On parle depuis quelques années de refroidisseurs pour l'électronique utilisant des métaux liquides : alliages à base de gallium ou des alliages de sodium-potassium. Le gallium liquide possède une conductivité thermique proche de 28 W/m/K, valeur qui est 40 fois plus grande que celle de l'eau.

On comprend donc que ce type de fluide permet d'atteindre des coefficients d'échange convectif très importants et donc une possibilité de dissipation très importante en terme de densité de flux de chaleur. Dans la majorité des cas, on utilise, pour mettre le liquide en mouvement, une pompe mécanique qui, en général, est source de bruit, d'encombrement et de défaillances à cause des pièces mécaniques en mouvement. On préfère donc s'en passer dès que possible. Outre leur forte conductivité thermique, les métaux liquides ont aussi pour avantage d'être de bons conducteurs électriques ce qui rend possible l'utilisation de pompes électromagnétiques (Magnéto-Hydro-Dynamiques ou MHD). Ces pompes reposent sur l'utilisation couplée d'un champ magnétique et d'un courant qui crée une force de Laplace entraînant le fluide à travers le circuit hydraulique. L'intérêt de cette pompe est qu'elle est sans pièce tournante et donc silencieuse. Ce type de pompe rend le système de refroidissement plus fiable, silencieux, et plus facile à commander [1].

Il existe aujourd'hui des exemples de boucles de refroidissement pour les systèmes électroniques faisant appel à des métaux liquides mis en mouvement par ce type de pompe. On citera en particulier le refroidisseur présenté par Nanocoolers [2] qui n'aura finalement jamais été commercialisé et celui vendu par la société Danamics [3]. La boucle de refroidissement fabriquée par Nanocoolers utilise une pompe Magnéto-Hydro-Dynamique à courant et champ magnétique continu (MHD DC) pour un fluide métallique de type GaInSn afin de refroidir des composants électroniques (microprocesseurs essentiellement). La pompe MHD DC génère une pression de l'ordre de 25 kPa avec un débit de 141 mL/min. Ce système, selon Nanocoolers, est capable d'évacuer une densité de flux de chaleur supérieure à 200W/cm². Une autre société, DANAMICS, a développé un système de refroidissement avec un autre liquide métallique : le NaK. D'après leur site Internet [3], ce produit montre que l'utilisation d'un métal liquide pour le

refroidissement de composants électroniques n'est pas aberrant en termes économiques. La pompe électromagnétique utilisée dans le système de refroidissement s'appelle Multi-string electromagnetic pump. Comme toutes les pompes électromagnétiques, elle possède beaucoup d'avantages mais le point le plus avantageux de cette pompe est qu'elle possède un MTBF (mean time between failures ou temps moyen entre pannes) très élevé. En plus, cette pompe peut être utilisée dans les petits ordinateurs grâce à sa faible dimension.

Cependant, l'utilisation d'un fluide métallique dans une boucle de refroidissement présente aussi des inconvénients : d'une part, la consommation électrique de la pompe électromagnétique (en particulier, la pompe magnétohydrodynamique à courant continu) peut être importante provoquant ainsi une diminution forte du rendement global du système. Le rendement de la pompe est en général limité à quelques dizaines de pourcents. D'autre part, certains fluides métalliques, comme le gallium, ont tendance à dissoudre la plupart des métaux classiques comme par exemple l'aluminium ou le cuivre. Ceci peut être extrêmement contraignant pour le choix des différents matériaux de la boucle de refroidissement. De plus, la température de fusion (ou de solidification) du gallium est située autour de 30°C. Ceci est également très contraignant car il faut que la boucle de refroidissement puisse encaisser les variations de volume du fluide lors du changement d'état. Pour réduire ce problème, il est courant d'utiliser des alliages de gallium à base d'étain ou d'indium qui permettent de diminuer la température de fusion. Celle-ci reste néanmoins souvent supérieure à 0°C. Pour terminer, notons que le coût du fluide métallique est relativement élevée (~1000 € pour un kilogramme) et que ce dernier est également assez lourd (masse volumique du gallium : 6300kg/m³).

Dans cet article, nous présenterons dans un premier temps l'étude et la mise en œuvre d'un système de refroidissement utilisant un alliage gallium-étain. Dans cette partie, nous présenterons le banc expérimental puis comparerons des résultats de simulation et des tests du refroidisseur réalisé. Après avoir validé nos résultats expérimentaux, nous présenterons une étude théorique sur un exemple qui nous permettra de discuter des potentialités du refroidissement par métal liquide.

II. PRESENTATION DE LA BOUCLE DE REFROIDISSEMENT

A. Description du banc expérimental

La figure 2 présente la boucle de refroidissement que nous avons réalisée. Cette boucle est composée d'une pompe MHD à conduction, d'un refroidisseur à minicanaux rectangulaires, d'un échangeur tubulaire à contre-courant. Les conduits, dans lesquels circule le fluide, sont des tubes en inox et les raccords sont de type Swagelok. Ils présentent peu de pertes de charge. Nous avons entouré ces tubes par des fils chauffants permettant de maintenir le fluide à température suffisante pour qu'il ne se solidifie pas. L'inox a été choisi pour la tubulure car il n'est pas dissous par le gallium à température ambiante.

Le remplissage dans le circuit est effectué sous vide. Pour cela, on introduit dans le circuit du métal liquide contenu dans un réservoir en inox. Le vide est obtenu grâce à une pompe à

vide primaire. Après chaque manipulation, nous réinjectons le gallium dans le réservoir pour éviter la dégradation du circuit qui pourrait avoir lieu à cause de la dilatation du gallium lors de sa solidification. Une vanne sert à régler le débit dans la boucle. La mesure du débit est effectuée en utilisant deux thermocouples de type E fixés à l'entrée et à la sortie du refroidisseur. Le débit Q est alors calculé grâce à la relation suivante :

$$Q = \frac{P}{\rho \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)} \quad (1)$$

avec P le flux de chaleur entrant dans le refroidisseur, ρ la masse volumique, C_p la chaleur spécifique du fluide, T_s la température de mélange de sortie du fluide et T_e la température d'entrée du fluide. Pour mesurer la pression, nous avons inséré deux capteurs de pression différentielle dans la boucle aux bornes de la pompe et du refroidisseur.

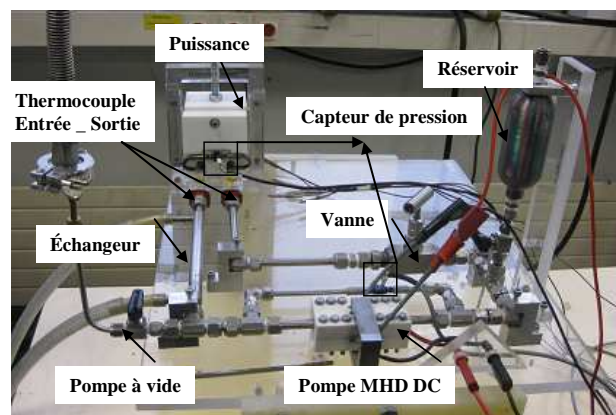
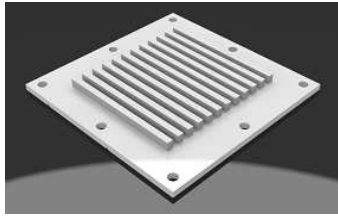


Figure 2 : Photographie de la boucle de refroidissement

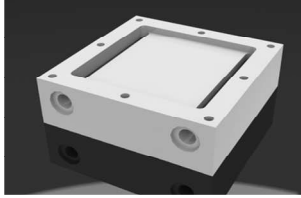
La puissance thermique est créée grâce à des cartouches chauffantes insérées dans un bloc en aluminium, ces cartouches peuvent dissiper une puissance supérieure à 1kW. Elles ont été réparties de sorte à obtenir une densité de flux de chaleur uniforme à la surface du refroidisseur.

Le refroidisseur à minicanaux est composé de deux plaques vissées l'une sur l'autre, la plaque inférieure est en inox et la plaque supérieure (côté en contact avec la source de chaleur) est en molybdène (figure 3). Ce matériau a été choisi car il comporte de bonnes propriétés thermiques (conductivité thermique 138W/m/K) et il n'est pas dissous par le gallium. L'ensemble des deux plaques forme 12 ailettes et 11 canaux (hauteur 3 mm, largeur 2 mm et longueur 42 mm). Le refroidisseur et le système de chauffage sont isolés avec un bloc de Téflon pour éviter les pertes thermiques vers l'extérieur. Nous avons inséré à la surface du refroidisseur quatre thermocouples qui mesurent la température de surface du refroidisseur (au dessus des canaux).

La température du fluide est réglée grâce à l'échangeur tubulaire à contre-courant qui est relié à un refroidisseur à circulation Julabo. Ce bain permet également d'évacuer la chaleur de la boucle de tests.



a. La plaque de molybdène



b. La plaque en inox comportant les raccords au circuit hydraulique

Figure 3 : Constitution du refroidisseur à mini canaux

B. Simulation du refroidisseur et résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présentons la modélisation de la géométrie du refroidisseur (plaque supérieure) à l'aide du logiciel Flotherm spécialisé dans la simulation des écoulements et des transferts de chaleur dans les systèmes électroniques. Nous simulons le cas où la densité de flux est uniforme à la surface du refroidisseur. Nous négligeons également les échanges de chaleur ayant lieu aux entrées-sorties du refroidisseur. Nous pouvons alors simuler le refroidisseur en n'étudiant qu'un seul canal. Par symétrie, nous ne modélisons qu'un demi-canal du refroidisseur et lui appliquons une source de chaleur uniforme sur toute la surface supérieure (figure 4). On impose la température d'entrée du fluide à 30°C.

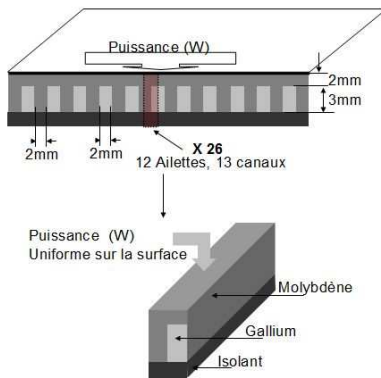


Figure 4 : Modélisation du refroidisseur

Nous avons effectué diverses simulations en faisant varier la puissance imposée sur la surface et le débit du fluide entrant dans le refroidisseur. Le but principal de ces simulations est de comparer les résultats avec des valeurs expérimentales afin de valider la modélisation. La figure 5 présente l'évolution de la température à la surface du refroidisseur. Il s'agit de la comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour un débit de 0.5litre/min et pour plusieurs valeurs de puissance imposée au refroidisseur (50W, 200W, 400W). On remarque clairement la non homogénéité de la température sur la surface, qui est due à l'échauffement du fluide le long du canal. Il s'agit d'un des principaux défauts de la technique de

refroidissement par minicanaux. La figure 6 représente l'évolution de la température de surface pour une puissance de 200W uniforme sur la surface, et des débits de 0.3litre/min et 0.8litre/min.

On observe clairement sur ces deux graphes que les résultats expérimentaux sont cohérents avec ceux de la simulation. Notre modélisation est donc valable. Nous la réutiliserons dans la partie suivante consacrée aux potentialités des métaux liquides pour le refroidissement.

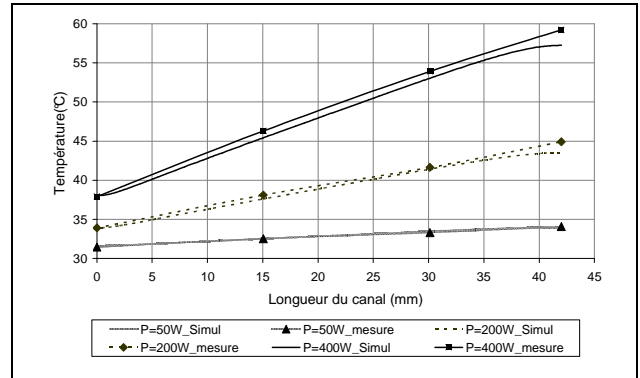


Figure 5 : Température de surface en fonction de la puissance

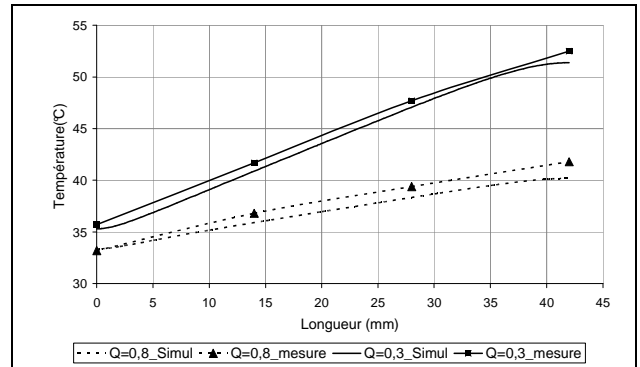


Figure 6 : Température de surface pour plusieurs valeurs de débit

III. COMPARAISON D'UN REFROIDISSEUR A METAL LIQUIDE ET D'UN REFROIDISSEUR A EAU

Après avoir validé expérimentalement les résultats de simulation, nous pouvons désormais nous appuyer sur le logiciel Flotherm. Nous présentons dans cette partie l'étude du refroidissement d'une puce de puissance de dimensions 1cm*1cm*0.1mm brasée sur un refroidisseur à minicanaux de dimensions 2.1cm*2.1cm dont le fluide caloporteur est un alliage Gallium-Indium comme pour la partie précédente (figure 7).

Les 10 canaux ont une longueur de 21 mm, une largeur de 1 mm et une hauteur de 2 mm. La brasure (SnPb) a une épaisseur de 50µm. La base du refroidisseur (zone entre la brasure et les canaux) a une épaisseur de 1.5mm.

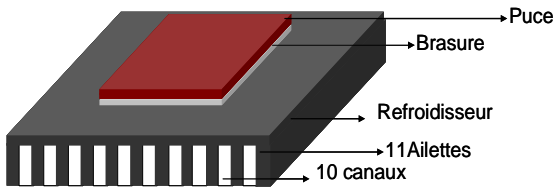


Figure 7 : Géométrie simulée

Trois cas seront comparés entre eux faisant intervenir différents matériaux pour le refroidisseur et différents fluides caloporteur. Le premier utilise l'alliage de gallium comme fluide caloporteur et le tungstène. Ce dernier a été choisi car il n'est pas dissous par le gallium et il a une très bonne conductivité thermique (180 W/m/K). Même si le cuivre ne paraît pas utilisable à priori avec un métal liquide à base de gallium, nous avons fait une simulation avec le couple cuivre/alliage de gallium car elle nous servira de référence pour montrer l'intérêt d'utiliser un matériau très bon conducteur de la chaleur pour le refroidisseur. Notons que le cuivre pourrait être utilisé avec un dépôt en surface d'un matériau compatible avec le gallium. Des simulations seront également effectuées avec le couple cuivre/eau afin de montrer l'intérêt du métal liquide pour le refroidissement. La géométrie simulée est représentée sur la figure 8. Grâce à la symétrie, nous n'avons simulé que la moitié du refroidisseur. La température d'entrée du fluide est ici 25°C.

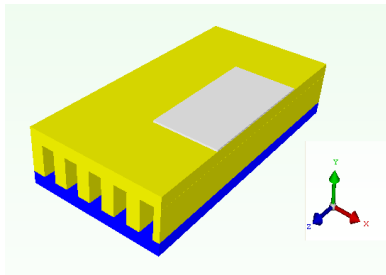


Figure 8 : Géométrie simulée

Afin de poser une base de comparaison pour l'utilisation de l'eau et du métal liquide, nous avons choisi comme critère la puissance de pompage. Cette puissance correspond au produit débit*pertes de charge. Dans cet exemple, nous avons fixé le débit de l'alliage de gallium à une valeur de 1,29 litre/min. Cette valeur a été choisie car elle correspond à une élévation de température du fluide de 20°C pour une puissance de 1kW. Les pertes de charge obtenues par simulation correspondent à 2,47 kPa (tableau 1). Grâce à plusieurs simulations, nous avons déterminé le débit d'eau correspondant à une puissance de pompage identique.

	Q(l/min)	ΔP (kPa)	Ph(W)
Métal liquide	1.29	2.47	0.05
Eau	2.10	1.54	0.05

Tableau 1 : Propriétés de l'écoulement pour le métal liquide et l'eau

La figure 9 montre la valeur de la résistance thermique pour les trois modèles étudiés. Cette résistance thermique est calculée en faisant la différence entre la température maximale au niveau de la puce et la température d'entrée du fluide et en divisant par la puissance injectée. Nous observons clairement que la valeur de la résistance thermique diminue avec

l'augmentation de la conductivité thermique du fluide et du matériau. Vu que le cuivre possède la conductivité thermique la plus élevée, le modèle cuivre/métal liquide a la résistance thermique la plus faible. Nous remarquons d'ailleurs que la résistance thermique augmente très fortement si le cuivre est remplacé par le tungstène (37%).

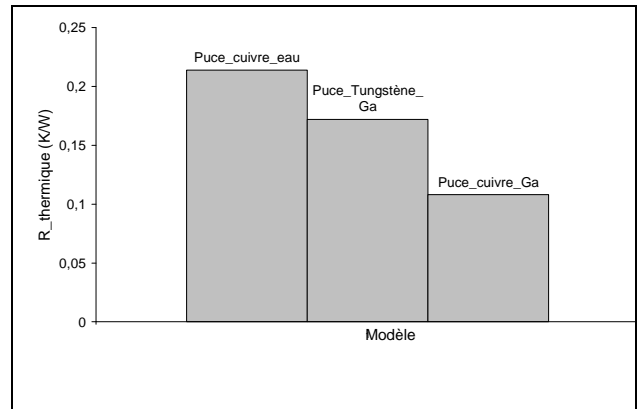


Figure 9 : Résistance thermique des trois modèles

Grâce aux valeurs de résistance thermique obtenues, nous pouvons tracer l'évolution de la température maximale de la puce en fonction de la puissance dissipée (figure 10) pour les 3 cas considérés. Si la température maximale de jonction de la puce est imposée à 125°C, on peut conclure qu'avec une telle puissance de pompage, la puce peut dissiper une densité de flux de chaleur de 900W/cm² en utilisant un refroidisseur en cuivre et le métal liquide. Si on remplace le cuivre par du tungstène, cette valeur chute à 600W/cm². Enfin, pour un refroidisseur en cuivre avec de l'eau, la puissance maximale que la puce peut dissiper sera de 400W/cm².

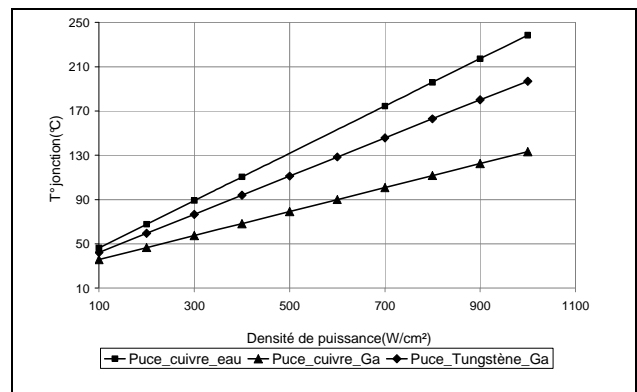


Figure 10 : Evolution de la température en fonction de la puissance dissipée dans la puce

Ces résultats démontrent que l'utilisation d'un métal liquide permet d'augmenter les densités de flux de chaleur dissipées par les composants. La prise en compte du matériau du refroidisseur est néanmoins très importante car nous voyons que l'utilisation du tungstène à la place du cuivre dégrade fortement le fonctionnement.

IV. CONCLUSION

Dans cet article nous avons voulu présenter l'étude d'un système de refroidissement par métal liquide. Pour cela nous avons présenté au début un bref état de l'art sur cette technologie et sur les systèmes existants soit chez Nanocoolers, soit chez Danamics. Nous avons ensuite

présenté notre boucle de refroidissement et les résultats expérimentaux qui ont été comparés à des simulations 3D effectuées avec le logiciel Flotherm. Dans la dernière partie nous avons présenté l'étude théorique du refroidissement d'une puce de puissance et nous avons pu démontrer l'intérêt de l'utilisation d'un fluide métallique par rapport à l'eau pour une puissance de pompage identique. Nous avons également vu que le choix du matériau constituant le refroidisseur est très important si l'on ne veut pas perdre tous les avantages apportés par le métal liquide. Le cas particulier présenté dans cette partie montre qu'une densité de flux de chaleur de l'ordre du millier W/cm^2 pourrait être obtenue avec cette technique.

V. REFERENCES

- [1]: Baker, R.S.; and Tessier, M.J., "Handbook of Electromagnetic Pump Technology", Elsevier Science Publishing, New York, 1987
- [2]: U. Ghoshal, D. Grimm, S. Ibrani, C. Johnston, and A. Miner, "High-Performance Liquid Metal Cooling Loops", NanoCoolers, Inc.
- [3]: www.danamics.com

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les partenaires et les financeurs du projet THERMELEC. Ils remercient également Emmanuel Arnould pour sa participation à la réalisation du banc expérimental.