

Optimisation constructale d'un système diphasique pour le refroidissement de composants électroniques

Rémi REVELLIN*, Jocelyn BONJOUR

CETHIL UMR5008 CNRS INSA Univ. Lyon 1, INSA-Lyon, Bât Sadi Carnot, 9 Rue de la Physique, 69621 Villeurbanne cedex

* (auteur correspondant : remi.revellin@insa-lyon.fr)

Résumé - Un dissipateur thermique diphasique en forme de disque et traversé par un réseau de microcanaux est modélisé. Dans chaque canal circule un fluide frigorigène (R-134a) sous forme diphasique liquide - vapeur. Le but de l'étude constructale est de déterminer les architectures les plus pertinentes afin d'améliorer le refroidissement. Dans un premier temps, le modèle de Revellin et Thome (2008) est utilisé afin de déterminer le flux critique. Dans un second temps, un modèle de conduction est couplé à un modèle thermohydraulique pour le frigorigène. Finalement, il est montré dans cette étude que l'on ne peut pas optimiser simultanément, le flux critique (qui doit être maximisé) et la résistance thermique du système (qui doit être minimisée).

Nomenclature

f	frottement	α, β, γ	angle, °
L	longueur, m		
m	débit massique, kg/s		
n	nombre de canaux		
N	nombre de canaux en périphérie		
Q	flux de chaleur, W		
q	densité de flux de chaleur, W/m ²		
T	température, °C		
	<i>Symboles grec</i>		
			<i>Indices et exposants</i>
		0	centraux
		max	maximum
		p	périphériques
		p	paroi
		sat	saturation

1. Introduction

Le refroidissement de composants électroniques et de l'électronique de puissance devient un enjeu majeur dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans l'aérospatial. Les microprocesseurs peuvent en effet se détériorer, typiquement, en cas de température supérieure à 85°C et ainsi subir des dommages irréversibles. Ainsi, le système de refroidissement doit pouvoir dissiper une forte densité de flux de chaleur (>300 W/cm²) tout en maintenant un gradient de température faible et des pertes de charge acceptables.

Dans la littérature, différents travaux portent sur la dissipation de chaleur dans un disque à l'aide d'un fluide caloporteur circulant dans des réseaux de microcanaux. Ces architectures d'écoulement sont souvent optimisées à l'aide de la théorie constructale. La théorie constructale permet entre autres l'émergence d'architectures souvent arborescentes, pour les écoulements de fluides à partir de l'analyse des contraintes locales (résistance thermique, résistance d'écoulement...) et globales (volume, surface...). Cette théorie généraliste a été mise au point par A. Bejan et fait l'objet de nombreuses études sur le plan international. Parmi ces publications, on peut notamment citer l'article de Wechsato et al. [1]. Ces derniers ont étudié la manière de concevoir un réseau dendritique de canaux reliant un point central unique à plusieurs points périphériques équidistants de façon à minimiser les chutes de pression monophasiques en régime laminaire pleinement développé. Le fluide caloporteur circulait soit du centre vers la périphérie, soit de la périphérie vers le centre et la production de chaleur était

volumique. Lorsque le rapport entre le rayon du disque et la distance entre canaux en périphérie augmentait (i.e. lorsque la taille de la structure augmentait), les performances étaient améliorées par l'utilisation de structures plus complexes (comportant plus de ramifications). De manière générale, il semblait également plus intéressant d'utiliser des ramifications à nombre de branches faible ; par exemple une architecture comportant 2 branches à chaque ramification était plus performante qu'une architecture comportant 3 branches par ramification. De plus, l'amélioration des performances était de moins en moins sensible au fur et à mesure que l'on complexifiait le système (Fig. 1)

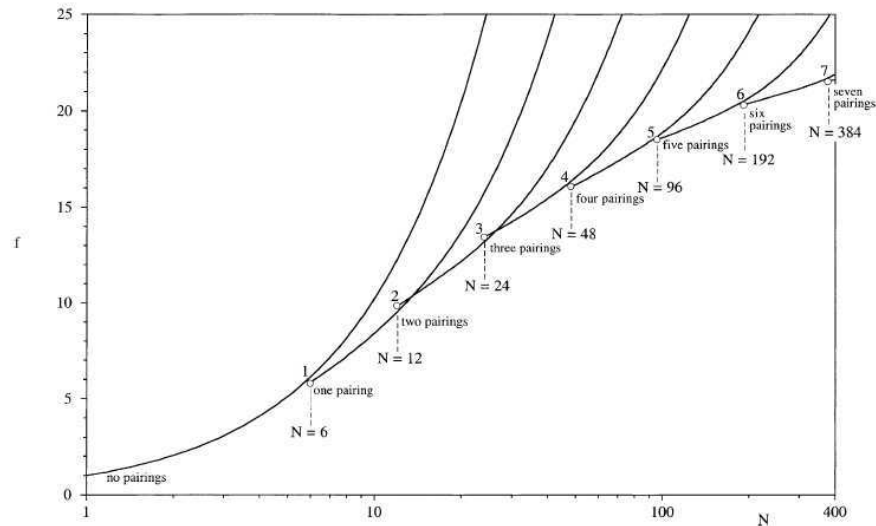


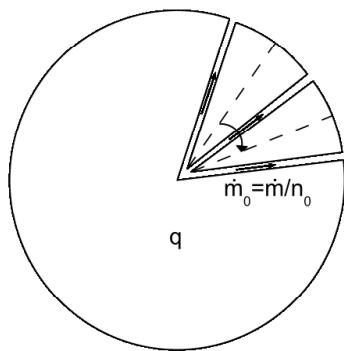
Figure 1 : Variation du coefficient de frottement (f) en fonction du nombre (N) de canaux en périphérie du disque Wechsato et al. [1].

Wechsato et al. [2] ont poursuivi leurs travaux en considérant le même disque, soumis à une production de chaleur surfacique uniforme, et refroidi par un réseau de canaux dans lesquels circulait un fluide à l'état monophasique. Au cours de cette seconde étude, le rayon du disque ainsi que le volume total des canaux étaient fixés et une architecture a été recherchée de manière à, d'une part minimiser les pertes de charge (et donc la puissance de pompage nécessaire à la circulation du fluide) et, d'autre part, à minimiser la résistance thermique globale de la structure. Wechsato et al. [2] concluaient qu'une architecture ramifiée donnait de meilleurs résultats lorsque l'on visait à limiter la puissance de pompage tandis qu'une architecture radiale, sans ramification, permettait d'obtenir une plus faible résistance thermique. De manière générale, que les canaux soient ramifiés ou non, une augmentation du débit de caloporteur entraînait une diminution de la résistance thermique ainsi qu'une augmentation de la puissance de pompage. Cette étude concluait que la performance d'une géométrie de type "ramifiée" augmentait lorsque l'on diminuait les échelles de longueur. L'étude de Gosselin [3] reposait quand à elle sur la minimisation des "coûts globaux", une approche qui permettait de tenir compte simultanément des pertes liées à la puissance de pompage ainsi que des coûts liés à la taille du système. Le système étudié était le même que précédemment, à savoir un disque exposé à une densité de flux de chaleur surfacique uniforme parcouru radialement par des canaux ramifiés dans lesquels circulait un fluide monophasique. Cette étude a permis de déterminer les angles optimaux au niveau des bifurcations ainsi que les rapports de diamètre de canaux avant et après ramification qui minimisaient ces "coûts globaux" pour différents types d'écoulement. D'autres études constructales, comme celle de Bello-Ochende et al. [4] ont été menées sur des géométries parallélépipédiques composées de canaux rectangulaires parallèles dans lesquels circulait un fluide monophasique en régime laminaire. Le but de leur étude était de modéliser le champ de température tridimensionnel de différentes architectures en utilisant la méthode des volumes finis afin de minimiser la surchauffe pariétale. Cette étude a permis de montrer que l'écart maximal de température était fortement dépendant de la fraction volumique de vide, les valeurs optimales de cette fraction se situant entre 0,4 et 0,5.

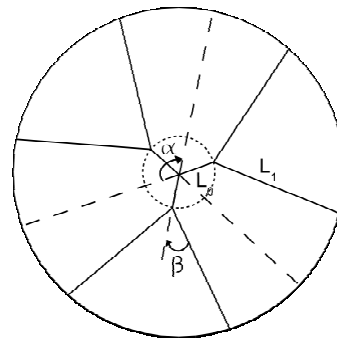
Nous avons pu constater que plusieurs études sur la théorie constructale portant sur la dissipation de chaleur dans un disque grâce à fluide caloporteur circulant dans des réseaux de microcanaux ont été

menées. Cependant, aucune de ces études ne traite d'un fluide frigorigène à l'état diphasique tout en tenant compte du phénomène de conduction de chaleur qui a lieu dans le matériau constituant le disque. Dans l'étude qui va suivre, on se basera sur les travaux de Revellin et al. [5] et Daguinet-Frick et al. [6]. Ces derniers ont récemment modélisé un diffuseur thermique diphasique en forme d'arbre constructal en couplant les lois de diffusion thermiques (conduction) avec des lois d'ébullition convective. D'un point de vue industriel, il s'agit de concevoir -et donc de manufacturer- une série de dissipateurs cylindriques comportant à l'intérieur des microcanaux pour assurer le refroidissement d'une paire de composants.

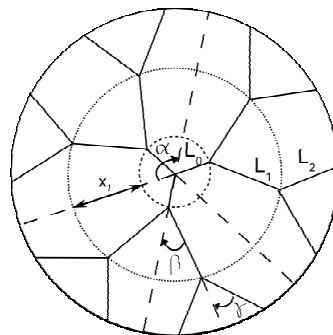
On fixera un rayon de disque de 20 mm, un volume de microcanaux de 0.154 ml et le frigorigène (R-134a) entrera au centre du disque en liquide saturé (30°C) et sortira en périphérie sous forme diphasique. Trois types d'architectures seront étudiées comme présenté sur la Fig. 2. La grande nouveauté dans ce travail est le couplage de la théorie constructale avec les écoulements diphasiques. Les modélisations étant très complexes, nous invitons le lecteur à se référer aux articles correspondants.



(a) Architecture radiale



(b) Architecture à une bifurcation



(c) Architecture à deux bifurcations

Figure 2 : Architectures étudiées.

2. Flux critique

Dans un système diphasique, le flux maximum qui peut être dissipé correspond au flux critique. Dans cet esprit, Revellin et al. [5] ont modélisé un dissipateur thermique diphasique en forme de disque afin de déterminer le flux maximum qui pouvait être appliqué sans tenir compte des transferts de chaleur par conduction au sein du disque. L'étude du flux maximum qui peut être dissipé par un diffuseur revient à l'étude du flux critique dans chaque canal en appliquant le modèle de Revellin et Thome [7].

Le fluide entre sous forme de liquide saturé au centre du disque et sort en périphérie sous forme diphasique après circulation dans un réseau de microcanaux radiaux, à une bifurcation ou à deux bifurcations. n_0 canaux se trouve au centre et n_p canaux en périphérie. Le nombre de microcanaux, les rapports de leurs diamètres avant et après ramification ainsi que le débit de frigorigène sont également variables. Le flux de chaleur est appliqué sur une seule face du disque. Pour un débit donné, plus le nombre de canaux augmente (à complexité de structure donnée), plus le flux maximum est élevé mais,

en contre partie, plus la puissance de pompage est élevée (Fig. 3). A faible puissance de pompage, on voit qu'il est plus avantageux d'utiliser un petit nombre de canaux radiaux (par exemple 8 canaux). Par contre, pour une puissance de pompage élevée (aux alentours de 0,02 W), il est préférable d'utiliser 64 microcanaux en périphérie et 16 canaux au centre du disque (2 bifurcations). Ainsi, par cette synthèse, on remarque que la complexité des réseaux n'est pas forcément optimale et qu'à chaque puissance de pompage, existe un flux maximum.

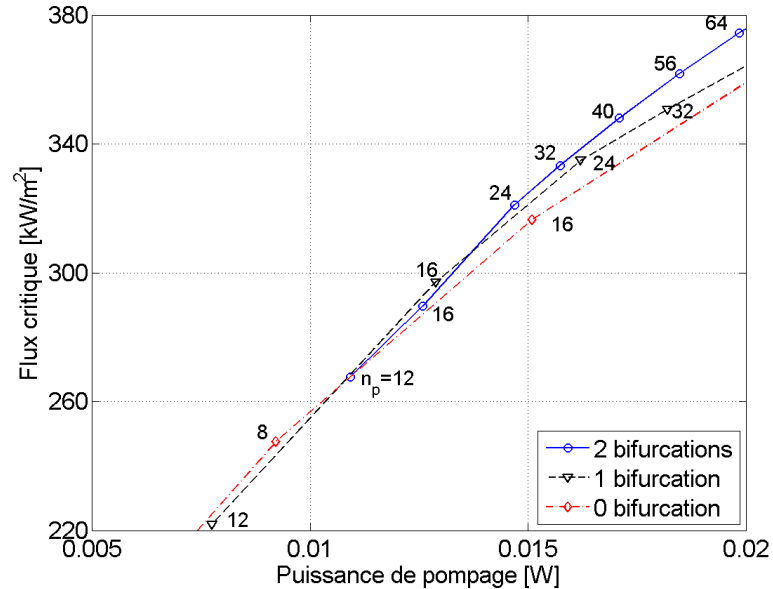


Figure 3 : Flux critique en fonction de la puissance de pompage pour un débit massique de 4 g/s et différentes architectures.

3. Résistance thermique

Le champ de température et la résistance thermique globale du diffuseur thermique ont été déterminés par Daguene-Frick et al. [6]. Un modèle stationnaire bidimensionnel de conduction thermique au sein d'un matériau (cuivre) a été couplé avec des modèles thermohydrauliques d'ébullition convective (modèle homogène pour la chute de pression et le modèle de Lazareck et Black pour le coefficient de transfert de chaleur). La géométrie du dispositif est de type circulaire, le dissipateur se présentant comme un disque traversé par plusieurs microcanaux agencés selon différentes configurations. Dans chaque canal circule un fluide frigorigène sous forme diphasique liquide-vapeur. Pour les trois types d'architecture (radiale, à une, ou à deux ramifications), l'étude montre, comme attendu, que les zones les plus chaudes se situent aux points les plus distants des microcanaux. On en conclut donc que la conduction thermique est le phénomène limitant. De plus, l'augmentation du nombre de canaux permet de diminuer fortement la résistance thermique ($Q/(T_{p,max} - T_{sat})$) du système dissipatif. De même, une augmentation du débit massique de frigorigène permet d'améliorer les performances thermiques du dispositif, cependant la puissance de pompage s'en trouve affectée. Comme présenté sur la Fig. 4, pour une faible puissance de pompage, l'architecture radiale présente une résistance thermique plus faible que pour l'architecture à une ramification. Pour une puissance de pompage moyenne, la résistance thermique est minimale pour une construction à une ramification. L'architecture à deux ramifications semble la solution la plus intéressante pour les fortes puissances de pompage après extrapolation des résultats. Les résultats pour deux bifurcations ont été limités par la connaissance des angles β et γ non disponibles dans la littérature.

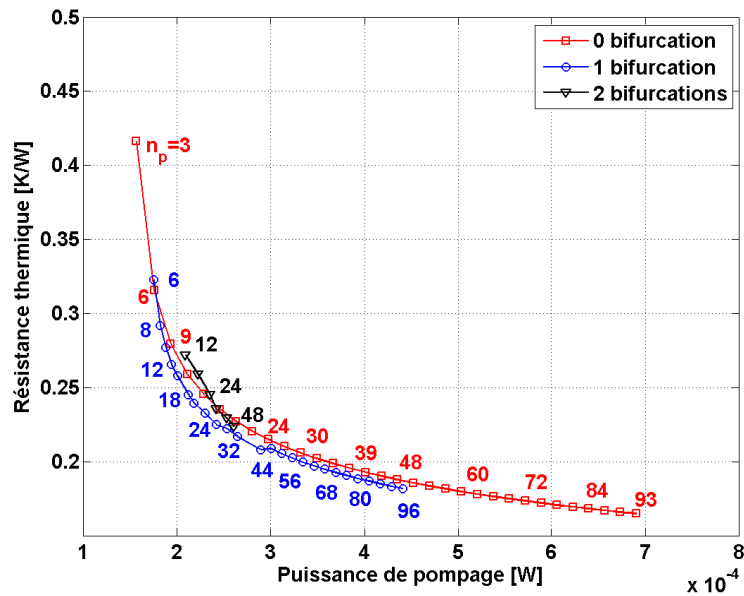


Figure 4 : Résistance thermique en fonction de la puissance de pompe pour différentes architectures (1g/s).

4. Discussion

Finalement, est-il possible en même temps de maximiser le flux critique et de minimiser la résistance thermique ? Un cas pratique a été envisagé récemment, pour optimiser le refroidissement de composants électroniques embarqués. D'un point de vue industriel, il s'agit de concevoir -et donc de manufacturer- une série de dissipateurs cylindriques comportant à l'intérieur des microcanaux pour assurer le refroidissement d'une paire de composants. Les composants sont localisés sur l'une des deux faces circulaires du cylindre et dissipent chacun au maximum 25 kW/m² (valeur rapportée à la surface sur laquelle ils sont localisés). Toutefois, ce système unique doit correspondre à deux contraintes thermiques : soit un fonctionnement simultané possible des deux composants, soit un fonctionnement de l'un des deux composants seulement. Dans les deux cas, il convient naturellement de maintenir la résistance thermique aussi faible que possible. La puissance de pompe maximum admissible est fixée à 0,4 mW. La Figure 5 montre que seule une architecture assez simple, radiale avec 3 ou 4 canaux, permet d'atteindre un flux critique de l'ordre de $2 \times 25 = 50$ kW/m².

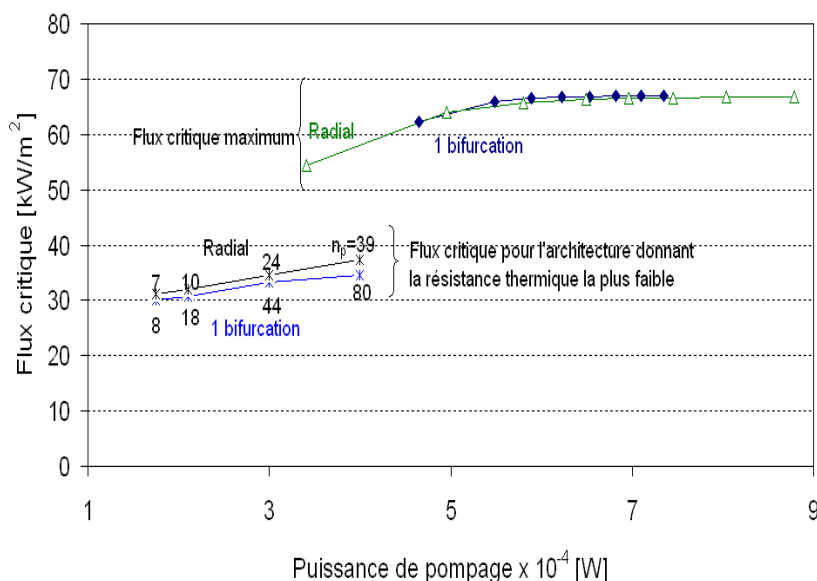


Figure 5 : Flux critique en fonction de la puissance de pompe pour différentes configurations: architecture sans contrainte et architecture donnant une résistance thermique minimale (1 g/s).

Elle s'impose donc dans le cas où les deux composants peuvent fonctionner simultanément. Malheureusement, ce choix conduit à une résistance thermique assez forte de l'ordre de 0,35 à 0,4 K/W (Figure 4). En revanche, si l'on choisit une architecture radiale avec 39 canaux, ou même une architecture avec 1 niveau de bifurcation et 80 ports de sortie, la résistance thermique est sensiblement plus faible (environ 0,15 K/W, Figure 4) mais le flux critique est de l'ordre de 35 kW/m² pour une puissance de pompage maximale de 0,4 mW (Figure 5) et n'est pas acceptable si les deux composants sont susceptibles d'être actifs simultanément. En d'autres termes, il n'est pas possible de maximiser à la fois le flux critique et de minimiser la résistance thermique. Cependant, ce système permet de répondre au cahier des charges de l'industrie aérospatiale : faible résistance thermique (faible différence de température) et optimisation de la puissance de pompage. Le flux critique calculé restant suffisamment élevé pour ces applications, il n'en est pas le facteur limitant.

5. Conclusion

Le refroidissement de composants électroniques et de l'électronique de puissance devient un enjeu majeur pour divers secteurs industriels. Les microprocesseurs peuvent en effet se détériorer, typiquement, en cas de température supérieure à 85°C et subir des dommages irréversibles. Ainsi, le système de refroidissement doit pouvoir dissiper un fort flux de chaleur (>300 W/cm²) tout en maintenant un gradient de température faible et des pertes de charge acceptables. Un dissipateur thermique diphasique sous forme de disque et traversé par un réseau de microcanaux a été modélisé. Dans chaque canal circule un fluide frigorigène (R-134a) sous forme diphasique liquide - vapeur. Le but de l'étude constructale est de déterminer les architectures les plus pertinentes afin d'améliorer le refroidissement. Dans un premier temps, le modèle de Revellin et Thome [7] est utilisé afin de déterminer le flux critique. En augmentant le nombre de canaux et le débit de frigorigène, le flux critique est augmenté. Cependant, cette première approche montre que la complexité du réseau n'est pas forcément la solution la plus pertinente pour maximiser le flux critique. Dans un second temps, un modèle de conduction est couplé à un modèle thermohydraulique pour le frigorigène. Finalement, il est montré dans cette étude que l'on ne peut pas optimiser en même temps, le flux critique et la résistance thermique du système. De même que pour le flux critique, à puissance de pompage donnée, les architectures complexes ne sont pas toujours les plus pertinentes pour diminuer la résistance thermique. Finalement, il est montré dans cette étude que l'on ne peut pas optimiser en même temps, le flux critique et la résistance thermique du système.

Références

- [1] W. Wechsatoł, S. Lorente and A. Bejan, Optimal tree-shaped networks for fluid flow in a disc-shaped body, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 45-25 (2002), 4911-4924.
- [2] W. Wechsatoł, S. Lorente and A. Bejan, Dendritic heat convection on a disc, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 46-23 (2003), 4381-4391.
- [3] L. Gosselin, Optimization of tree-shaped fluid networks with size limitations, *Int. J. Thermal Sciences*, 46-5 (2007), 434-443
- [4] T. Bello-Ochende, L. Liebenberg and J.P. Meyer, Constructal cooling channels for micro-channel heat sinks, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 50 (2007), 4141-4150
- [5] R. Revellin, J. R. Thome, A. Bejan and J. Bonjour, Constructal tree-shaped microchannel networks for maximizing the saturated critical heat flux, *Int. J. Thermal Sciences*, 48 (2009), 342-352.
- [6] X. Dagueneť-Frick, J. Bonjour and R. Revellin, Constructal microchannel network for flow boiling in a disc-shaped body, soumis à *IEEE Trans. Components Packaging Technologies* en Octobre 2008.
- [7] R. Revellin, J.R. Thome, A theoretical model for the prediction of the critical heat flux in heated microchannels, *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 51 (2008), 1216-1225.
- [8] B. Stutz, R. Revellin and J. Bonjour, Wall structuration for boiling-based cooling systems: constructal structuration or nanostructuration, *ENCIT2008 (Belo Horizonte (Brazil) – 12 November 2008)* (Keynote lecture)