

# Etude expérimentale des performances thermiques d'un diffuseur thermique diphasique soumis à des accélérations.

Mohamed Chaker ZAGHDOUDI<sup>1\*</sup>, Christian TANTOLIN<sup>2</sup>, Claude SARNO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Unité de Recherche Matériaux Mesures et Applications (MMA, 03UR13-03)  
INSAT - Centre Urbain Nord – BP N°676 – 1080 Tunis - Tunisie

<sup>2</sup>Thales Avionics

25, Rue Jules Védrynes – 26027 Valence Cédex - France

\* (auteur correspondant : chaker.zaghdoudi@insat.rnu.tn)

**Résumé** - Cette étude met en évidence l'influence des accélérations sur les performances thermiques d'un Diffuseur Thermique Diphasique (DTD) dont la structure capillaire est constituée de microrainures rectangulaires et de la poudre frittée. Lorsque le DTD est soumis à des accélérations, son comportement dépend de la nature de l'accélération qui lui est appliquée. Le décrochage et l'amorçage du DTD dépendent de l'amplitude de l'accélération mais aussi de la puissance. Dans tous les cas, la valeur de la résistance thermique du DTD obtenue sous l'effet de l'accélération demeure une valeur acceptable qui évite un échauffement excessif du composant électronique.

## 1. Introduction

Dans le domaine avionique, les cartes ou les modules peuvent dissiper des puissances supérieures à 100 W et les densités de flux locales atteintes, pour certains composants électroniques, sont de l'ordre de 10 W/cm<sup>2</sup> [1]. Ces contraintes thermiques rendent les techniques de refroidissement actuellement utilisées, qui sont basées principalement sur la conduction et la convection naturelle ou forcée, insuffisantes. En effet, ces techniques peuvent assurer le refroidissement des composants qui dissipent de faibles puissances, alors qu'elles ne permettent pas d'éliminer les points chauds générés par les composants électroniques dissipatifs. Ainsi, de nouvelles technologies, telles que l'utilisation des Diffuseurs Thermiques Diphasiques (DTDs), doivent être envisagées en relation avec les technologies existantes et qualifiées pour une utilisation dans le domaine avionique ou spatiale [2-7]. En plus des exigences thermiques, les nouvelles technologies de refroidissement doivent répondre aux exigences mécaniques, notamment aux vibrations et aux accélérations.

Dans les applications avioniques militaires, les accélérations sont très élevées et peuvent atteindre des valeurs proches de 10 g. Au cours des combats, les accélérations et les puissances dissipées par les cartes électroniques ne sont pas constantes. Ainsi, la détermination des performances thermiques des DTDs au cours des régimes permanent et transitoire ne peut être réalisée que par des approches expérimentales proches des situations réelles. Les niveaux des accélérations auxquelles sont soumis les DTDs sont alors déterminés à partir des normes avioniques.

Les travaux relatifs à l'étude de l'influence des accélérations sur le fonctionnement des DTDs sont rares. Les travaux théoriques et expérimentaux, publiés dans la littérature, ont pour but d'étudier le comportement des réseaux capillaires de caloducs ou de minicaloducs lorsqu'ils sont soumis à des accélérations supérieures à 1g. Les recherches, qui sont menées sur les phénomènes d'assèchement et de remouillage des structures capillaires, peuvent être classées en deux catégories selon la nature des essais réalisés. Ainsi, on distingue deux types d'essais pour lesquels : (i) la puissance à l'évaporateur est constante et le caloduc ou le minicaloduc est soumis à des accélérations dont l'amplitude varie. La direction des accélérations est longitudinale dans la direction de l'écoulement liquide-vapeur ou transversale dans une direction perpendiculaire aux écoulements, et (ii) le caloduc ou le minicaloduc est soumis à une accélération constante (longitudinale ou transversale) et la puissance à l'évaporateur varie.

## 2. Dispositif Expérimental

Le diffuseur thermique diphasique, qui a été conçu et réalisé par la société Thermacore, est constitué de six minicaloducs plats dont la disposition est donnée par la figure 1. Les minicaloducs sont logés dans une enveloppe en aluminium. Le montage des minicaloducs est effectué à l'aide d'une presse et à chaud afin de monter à la température de fusion des feuilles de brasure utilisées pour la fixation des minicaloducs. Chaque minicaloduc est constitué de trois microcanaux dont les parois sont tapissées par une poudre frittée. Les microcanaux sont rectangulaires ayant une largeur de 1,5 mm et une profondeur de 1 mm. La poudre frittée est constituée de billes en cuivre ayant 300  $\mu\text{m}$  de diamètre. Les caractéristiques géométriques du DTD sont données dans le tableau 1.

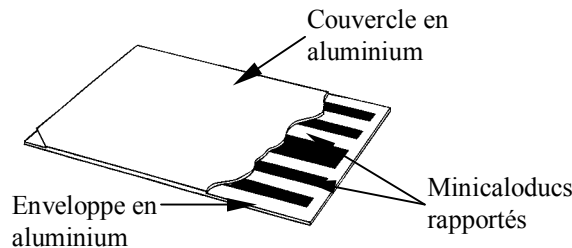


Figure 1 : Structure du DTD

DTD	Dimensions
Longueur	240 mm
Largeur	120 mm
Epaisseur	2.9 mm
Puissance	120 W
Fluide	Eau
Matériaux de l'enveloppe et du couvercle	Aluminium
Matériaux des minicaloducs rapportés	Cuivre
Structure capillaire	Microcanaux rectangulaires + Poudre frittée
<b>Evaporateur</b>	
Longueur	57.2 mm
Largeur	114.3 mm
<b>Condenseur</b>	
Longueur	10 mm
Largeur	120 mm

Tableau 1: Caractéristiques géométriques du DTD testé

Le DTD est fixé sur un banc conçu spécialement pour être monté sur une centrifugeuse afin de réaliser les essais d'accélération (figures 3 et 4). Une résistance chauffante en film permet d'apporter la chaleur à la zone d'évaporation. La zone de condensation est attachée à un drain thermique en aluminium et le refroidissement s'effectue par convection d'air. Des thermocouples de type J sont montés sur le DTD et permettent de mesurer l'écart de températures entre les sources chaude et froide. Les forces d'accélération sont générées par une centrifugeuse. Les variations des forces d'accélération sont obtenues en faisant varier la vitesse angulaire de la centrifugeuse. Un accéléromètre, positionné sur un rayon de 1 m, permet de mesurer les accélérations générées en fonction de la vitesse de rotation de la centrifugeuse. Les essais sont réalisés de telle sorte que le DTD soit soumis à des accélérations défavorables, i.e. la direction des forces inertielles dues aux accélérations est opposée à celle du retour du liquide vers la zone d'évaporation. Le minicaloduc est calorifugé afin de réduire les pertes thermiques par convection (non négligeables dans ce cas) et assurer un fonctionnement adiabatique. Les pertes thermiques sont évaluées à partir des essais préliminaires sur une plaque en cuivre ayant les mêmes dimensions que celles du DTD testé. L'évolution axiale de la température pariétale le long de la plaque en cuivre est déterminée à l'aide de 7 thermocouples de type J, ce qui permet de déterminer

le gradient de température et en déduire le flux de chaleur transféré par conduction. La comparaison entre ce flux et la puissance électrique imposée permet d'estimer les pertes thermiques. Les signaux électriques délivrés par les thermocouples sont amplifiés linéairement jusqu'à 10 V à l'aide de trois amplificateurs de type OMNI-AMP IV-13-230 commercialisés par la société OMEGA. Ces amplificateurs sont alimentés par une tension de 230 V et disposent d'une compensation électronique de la soudure froide (0,045°C/°C). Le facteur d'amplification est de 10 mV/°F. Les signaux électriques délivrés par les amplificateurs sont ensuite acheminés vers une centrale d'acquisition à travers des contacteurs tournants. Cette opération permet d'éviter la perturbation des signaux des thermocouples due à la chute de tension dans les contacteurs tournants.

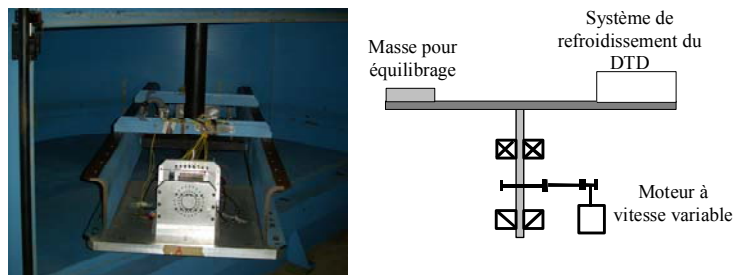


Figure 2 : Dispositif pour réaliser les accélérations

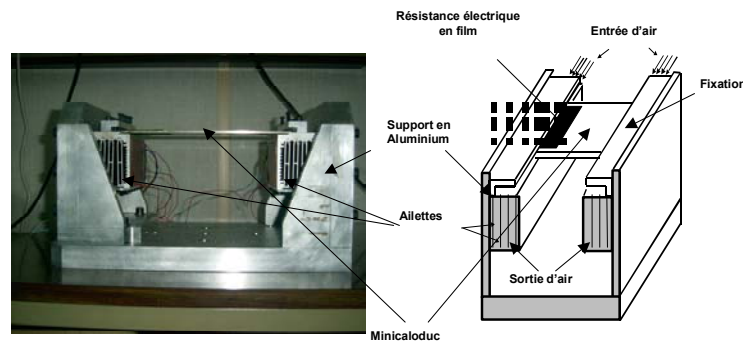


Figure 3 : Banc d'essai pour la détermination des performances thermiques du DTD

### 3. Procédures Expérimentales

Deux types d'accélération sont considérés. Le premier type d'accélération (type 1) consiste à faire varier linéairement la vitesse de rotation,  $\omega$ , de la centrifugeuse. La pente de la courbe obtenue (figure 4), qui représente la vitesse d'augmentation ou de diminution de  $\omega$ , peut être variable. Ainsi, la durée d'application de l'accélération peut être contrôlée. Au cours de cette étude, la vitesse avec laquelle  $\omega$  augmente ou diminue est fixée à 1 tr/minute/s. Il en résulte le profil d'accélération représenté sur la figure 5. Le profil de l'accélération  $\gamma$  est parabolique car  $\gamma$  est reliée à  $\omega$  par  $\gamma = \omega^2 r$  où  $r$  désigne la position radiale de l'accéléromètre par rapport au centre de la centrifugeuse. Ainsi, une vitesse de rotation de la centrifugeuse égale à 94 tr/min correspond à une accélération de 10g qui est atteinte en 94 secondes. La durée totale du test est la somme de trois durées : une durée de montée de 0g à 10g (94 secondes), une durée de stabilisation à 10g (5 secondes), et enfin, une durée de descente de 10g à 0g (94 secondes). Ainsi, la durée totale pour ce type de test est de 193 secondes.

Le second type d'accélération (type 2) consiste en une variation en escalier de la vitesse angulaire  $\omega$  de la centrifugeuse. La vitesse avec laquelle  $\omega$  augmente ou diminue est de 1 tr/min/s. Il en résulte le profil d'accélération représenté par la figure 5. Une stabilisation d'une durée de 10 secondes est assurée pour chaque niveau d'accélération atteint. La durée totale de ce test est d'environ 300 secondes. L'accélération 10g est atteinte au bout de 140 secondes.

Les essais sont réalisés pour différentes puissances imposées à l'évaporateur et le DTD est soumis aux différents types d'accélération pour chaque puissance imposée.

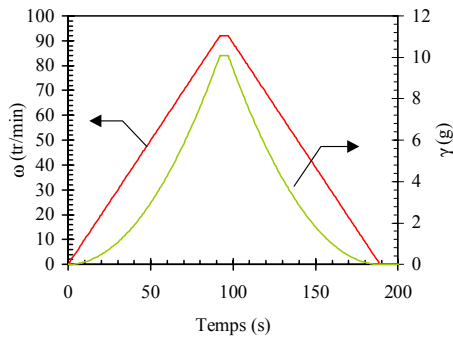


Figure 4 : Profil de l'accélération de type 1

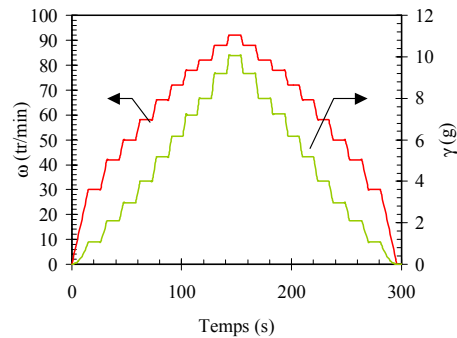


Figure 5 : Profil de l'accélération de type 2

## 4. Résultats Expérimentaux

Les variations de la température de la résistance chauffante, des parois de l'évaporateur et du condenseur ainsi que la résistance thermique du DTD sont représentées sur les figures 6 et 7, pour deux puissances imposées à l'évaporateur égales respectivement à 40 W et 100 W.

La figure 6 montre l'effet des accélérations de type 1. Lorsque le minicaloduc est soumis une accélération défavorable (direction de l'accélération est opposée à celle du retour du liquide), la répartition du liquide est affectée par les forces inertielles. En effet, une partie du liquide reste bloquée dans la zone de condensation. Ceci entraîne une légère diminution de la température de paroi du condenseur et réduit la surface de condensation, ce qui provoque l'augmentation de la température de paroi de l'évaporateur. Le décrochage du DTD sous l'effet d'une augmentation de l'accélération se produit lorsque la température de l'évaporateur augmente considérablement. Lorsque l'accélération diminue, le caloduc ne se réamorçe pas rapidement. Les températures continuent alors à augmenter jusqu'à ce que la réduction du niveau de l'accélération soit suffisante pour produire leur diminution. Cette hystérésis, qui correspond au fonctionnement transitoire du DTD lorsqu'il décroche sous l'effet de l'accélération, est due au comportement du réseau capillaire sous l'effet combiné de la puissance et des forces d'accélération. En l'absence d'accélération, lorsque la puissance dissipée  $Q = 40$  W, la résistance thermique du DTD vaut 0,46 K/W. Pour des accélérations supérieures à 1g, le DTD se désamorçe et sa résistance thermique augmente pour atteindre une valeur de 0,65 K/W lorsque l'accélération est de 10g, ce qui correspond à une augmentation de la résistance thermique d'environ 150 % par rapport à la valeur mesurée en l'absence d'accélération. Lorsque l'accélération décroît, la résistance thermique du DTD diminue et atteint sa valeur initiale lorsque l'accélération est supprimée. Lorsque la puissance imposée à l'évaporateur est  $Q = 100$  W, la résistance thermique du DTD varie de 0,26 K/W, lorsqu'il n'est soumis à aucune accélération, à 0,56 K/W, lorsque l'accélération est égale à 10g, ce qui correspond à une augmentation d'environ 200%. La température de l'élément chauffant ne dépasse pas 120 °C lorsque l'accélération est égale à 10g. Le DTD se réamorçe totalement lorsque l'accélération est supprimée. Nous notons également une diminution de la résistance thermique lorsque la puissance imposée à l'évaporateur augmente, en l'absence et en présence des accélérations.

La figure 7 montre l'effet des accélérations de type 2. Dans ces conditions, le comportement du DTD est légèrement différent de celui observé sous l'effet des accélérations de type 1. En effet, l'hystérésis thermique est plus marquée pour ce type d'accélération. Pour une puissance  $Q = 40$  W, lorsque l'accélération passe de 0 à 10g, la résistance thermique varie de 0,36 K/W en l'absence d'accélération à 0,68 K/W pour une accélération de 10g, ce qui correspond à une augmentation de la résistance thermique d'environ 190 %. Lorsque la puissance imposée à l'évaporateur est égale à 100 W, la résistance thermique du DTD passe de 0,27 K/W pour une accélération nulle à 0,66 K/W pour une accélération de 10g, ce qui correspond à une augmentation de la résistance thermique d'environ 250 %. Pour ce type d'essai, la température de l'élément chauffant dépasse 120 °C lorsque la puissance imposée et l'accélération valent respectivement 100 W et 10g. Dans tous les cas, le DTD se réamorçe lorsque l'accélération est supprimée.

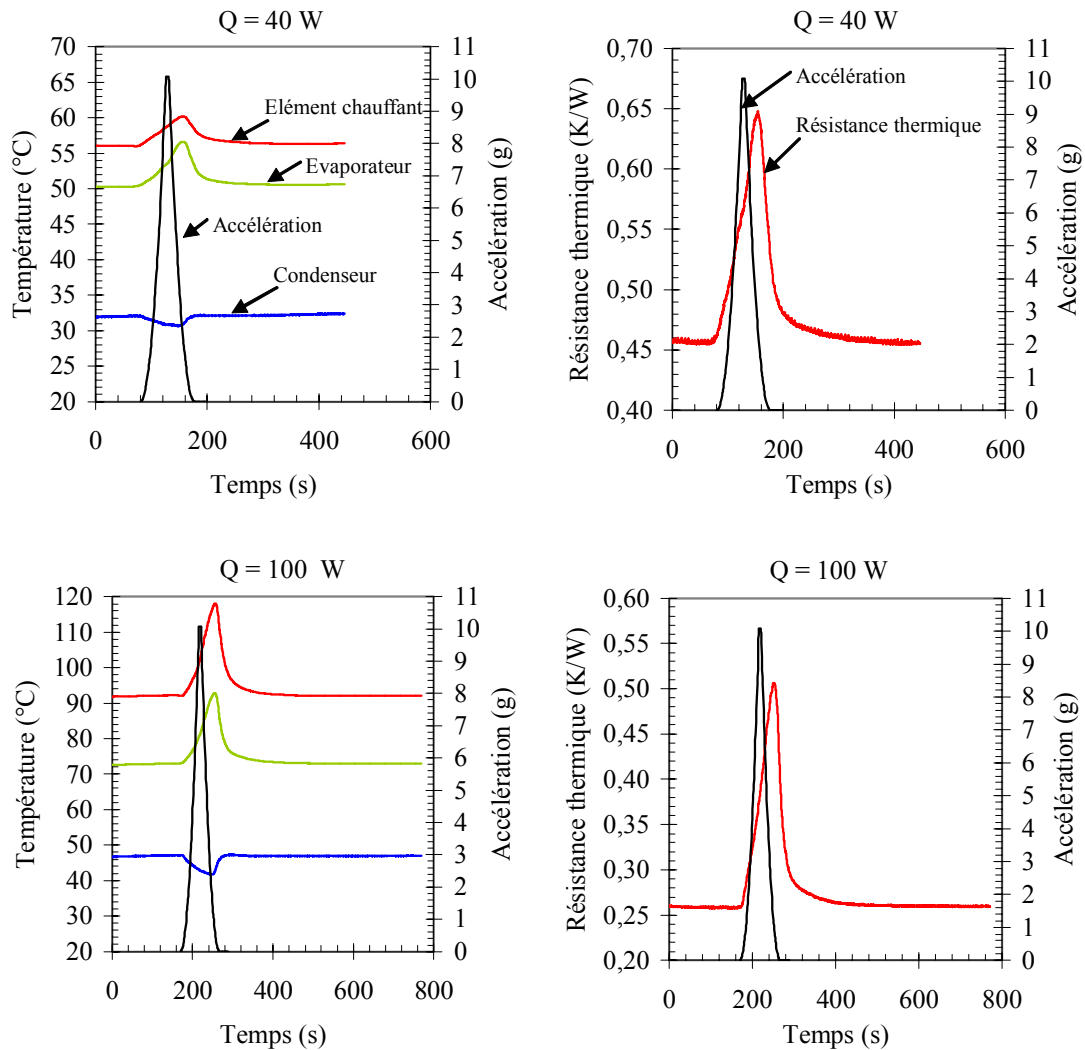


Figure 6 : Effet des accélérations de type 1 sur les performances thermiques du diffuseur thermique

## 5. Conclusion

Cette étude met en évidence l'influence des accélérations sur les performances thermiques d'un DTD dont la structure capillaire est constituée de microrainures rectangulaires et de la poudre frittée. Lorsque le DTD est soumis à des accélérations, son comportement dépend de la nature de l'accélération qui lui est appliquée. Deux types de profils d'accélération sont considérés : (i) profil parabolique (type 1), (ii) un profil en escalier dont la durée de chaque niveau d'accélération est fixée (type 2). Différentes puissances imposées à l'évaporateur sont considérées pour chaque type d'accélération. Le décrochage et l'amorçage du DTD dépendent de la nature de l'accélération mais aussi de la puissance.

Le comportement d'un DTD lorsqu'il est soumis à des forces inertielles est difficile à prédire même si la structure capillaire est optimisée pour ces conditions de fonctionnement. En effet, le décrochage et l'amorçage dépendent de l'amplitude de l'accélération, de sa fréquence, de sa direction, de la puissance de la source chaude à refroidir et de la charge en fluide. Ce dernier paramètre affecte notablement le comportement du DTD soumis à des accélérations. Ainsi, le réamorçage de DTDs courts est plus facile que ceux longs car la charge en fluide est plus faible et les pertes de pression dans les phases liquide et vapeur sont réduites. De même, le choix de la structure capillaire joue un rôle primordial. Des essais effectués sur des DTDs comportant des mèches et des DTDs pulsés montrent qu'ils ne se réamorcent pas quelles que soient l'amplitude de l'accélération et la puissance imposée.

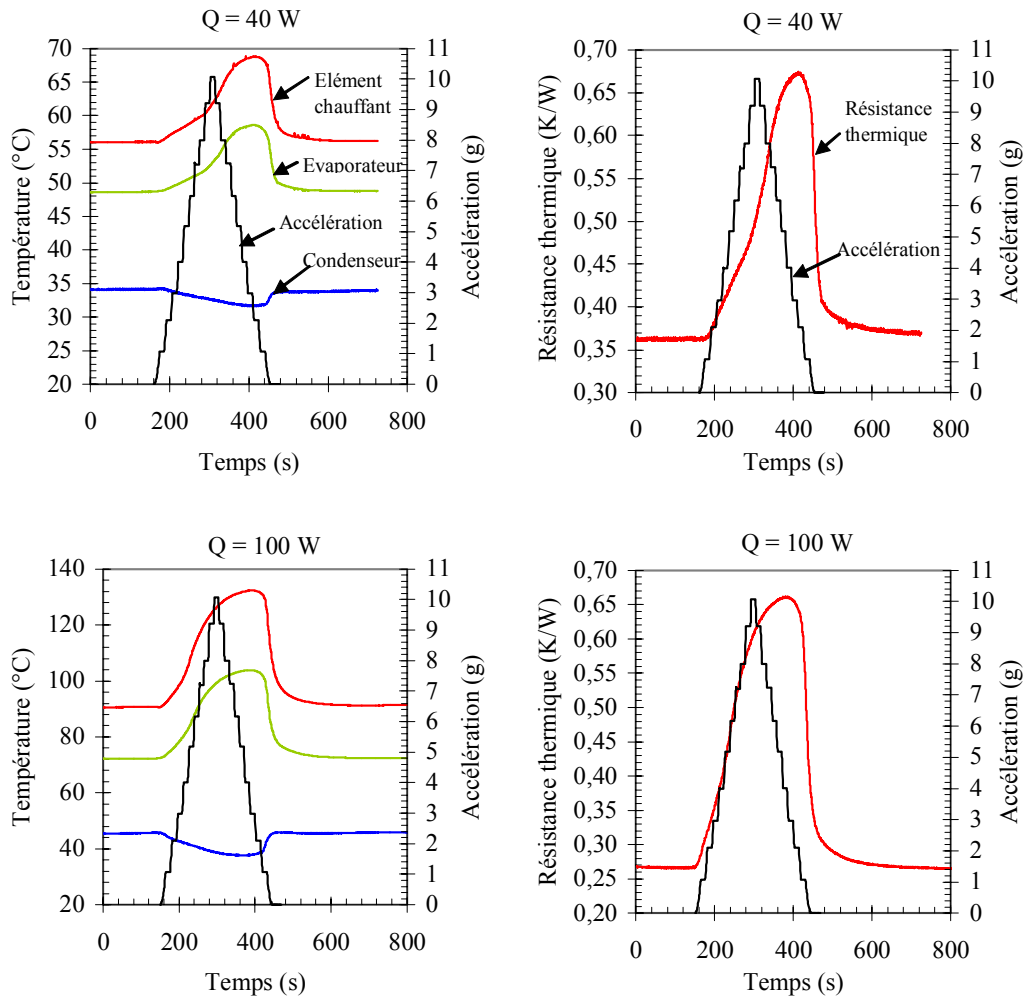


Figure 7 : Effet des accélérations de type 2 sur les performances thermiques du diffuseur thermique

## Références

- [1] C. Sarno, G. Moulin, Thermal management of highly integrated electronic packages. *Electronics Cooling*, 2001, Vol 7, n° 4, p 12-20.
- [2] M.C. Zaghoudi, C. Tantolin, C. Godet, Flat heat pipe thermal performance in body force environment. *ITHERM 2000. The Seventh Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic systems* (Edited by G.B. Kromann, J.R. Culham, K. Ramakrishna), Las Vegas, Nevada (USA), 23-26 May, 2000, Vol. 2, p. 114-121.
- [3] M.C. Zaghoudi, C. Sarno, Experimental investigation on the effects of body force environment on flat heat pipes performance. *39<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada (USA), 8-11 January, 2001, paper N° 2001-0364, 10p.
- [4] M.C. Zaghoudi, C. Sarno, Investigation on the Effects of Body Force Environment on Flat Heat Pipes. *J. Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 15, 2001, n° 4, , p 384-394.
- [5] M.C. Zaghoudi, C. Tantolin C., A. Teytu, Effects of body force environment on flat heat pipe thermal performance. *6<sup>th</sup> International Heat Pipe Symposium (6IHPS 2000)*, Chiang Mai (Thailand), 5-9 November, 2000b, 8p.
- [6] M.C. Zaghoudi, A. Teytu, Use of heat pipes for avionics cooling. *3<sup>rd</sup> Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000)*, Edited by Thieng Beng LIM, Charles LEE, Kok Chuan TOH), Sheraton Towers (Singapore), 5-7 December, 2000, p. 425-430.
- [7] M.C. Zaghoudi, C. Godet, Experimental investigation on the use of heat pipes for avionics electronic modules cooling. *40<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, Reno, Nevada (USA), 14-17 January, 2002, paper N° 2002-0205, 10p.