

Étude expérimentale d'un caloduc à rainures trapézoïdales en différentes positions

Ghada CHIBANI^{1,2}, Saloua BOUADILA², Safa SKOURI², Amenallah GUIZANI² Mohamed Chaker ZAGHDOUDI¹

¹Laboratoire de Recherche Matériaux Mesures et Applications (MMA),
Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT), Centre Urbain Nord –
BP N° 676 – 1080 Tunis Cedex, Tunisie

²Laboratoire des procédés thermiques
Centre de Recherche et des Technologie de l'Energie (CRTE). Technopole Borj-Cédria B.P N°95 - 2050
Hamam-Lif - Tunisie

* auteur correspondant : ghada.chibani@gmail.com

Résumé –. Le présent travail, réalisé au sein du Laboratoire de Recherche Matériaux Mesures et Applications (MMA), à Institut National des Sciences Appliquées et de Technologie (INSAT), représente une étude expérimentale qui a pour but la caractérisation thermique d'un caloduc rainuré en cuivre cylindrique remplie d'eau dans des opérations au régime transitoire et stationnaire. L'objectif principal de cette étude est la détermination des performances thermiques du caloduc en fonction de la température imposé à l'évaporateur (source chaude).

Afin de caractérisé le caloduc, une mesure de températures est faite tout au long de ce dernier. La principale caractéristique thermique du caloduc est la résistance thermique R_{th} , qu'on détermine a chaque point de mesure. Cette évaluation de température pendant le régime permanent nous fait aboutir à une estimation de résistance thermique du caloduc proposé a permis de montrer l'efficacité dans différentes position.

Mots Clés : caloduc, changement de phase, résistance thermique, position

Nomenclature

		<i>Indices et exposants</i>	
Q	Flux thermique, W	ad	Adiabatique
R	Résistance thermique, W ⁻¹	c	Condenseur
T	Température, °C	ev	Evaporateur
Z	position	th	Thermique
		Tot	Totale

1. Introduction

Les densités de flux de chaleur à évacuer des composants électronique posent des problèmes de surchauffe et peuvent atteindre plusieurs centaines de Watts par cm² [1]. Spécifiquement, les modules de puissance ont tendance à devenir de plus en plus compacts ce qui engendre une augmentation significative des densités de flux à évacuer. Un refroidissement performant est devenu impératif, il est nécessaire de développer des dispositifs permettant l'évacuation de la chaleur excédentaire et l'adapter ainsi à des différentes puissances sources de chaleur en électronique. Il est primordial de refroidir ces composants pour maintenir sa température de bon fonctionnement. Pour les conditions industrielles et pour garantir la fiabilité de ces composants, la température ne dépasse jamais 125°C. Les composants électroniques ont un

caractère thermosensible : en dépassants le niveau de la température maximale ils ont des performances insatisfaisants, et risque être endommagé.

De nombreux types de refroidissement ont été conçus et étudiés. Entre l'ensemble de ces solutions notre étude est dirigée vers les systèmes exploitant les caloducs qui reposent principalement sur les performances thermiques et la fiabilité de ce type de refroidisseur. Caractérisé par un fonctionnement autonome, sans organe mécanique en mouvement ni électrique, permet d'atteindre la fiabilité exigées. Le caloduc étant un dispositif capable de transmettre le flux thermique avec un très faible gradient de température à travers le changement de phase liquide-vapeur et la circulation d'un fluide à l'état de saturation. Plusieurs études ont été réalisées sur ce dispositif depuis qu'on s'est intéressé au caloduc dans le domaine spatial au milieu du siècle précédent pour que des études plus approfondie se fait en 20 ans après.

Le but de ces études était d'optimiser les performances du caloduc dans différents domaine d'application notamment la nature du fluide, la forme intérieure, la nature de la mèche transportant le liquide, la position du caloduc. En effet, Chi S.W [2] s'est intéressé à expliquer les principes de ces système énergétique se basant sur les lois fondamentales de la thermodynamique, transferts de chaleur, aussi bien au types de fluides (eau, ammoniac, méthanol...) et les applications dans les procédés industrielle. K.V. Paiva et Al [3] à étudier l'effet de la gravité et la microgravité du caloduc pour simuler les conditions spatiale et démontre que les mini caloducs remplie en méthanol une résistance thermique faible dans les deux conditions étudiées. Salem A. et al [4] dans une étude expérimentales en différentes positions a montré, en comparant deux caloducs avec et sans mèches (coton), que les performances de celui ayant la mèche est plus importante de point de vue transfert thermique. Dans ce travail nous proposons d'étudier les performances thermique du caloduc en particulier la résistance thermique. En premier lieu une présentation du principe de fonctionnement du caloduc sera faite. Nous aborderons alors les phénomènes d'échange que le caloduc adapte pour le transfert de chaleur pour finir avec une étude expérimentale.

2. Principe de fonctionnement du Caloduc

Le caloduc est un système fermé permettant des changements de phase d'un fluide caloporteur, de transférer de la chaleur à un endroit à un autre sans utiliser de pompes ou autre appareil mécanique.

Il se constitue d'un matériau enveloppé dont la paroi intérieure présente un réseau capillaire saturé de liquide et d'un espace rempli de la valeur saturante de ce même liquide. Le fonctionnement du caloduc est expliqué dans la figure 1. Au niveau de la source de chaleur, il y a une évaporation du liquide présent dans le réseau capillaire ; la vapeur se dirige vers la source froide sous l'action du gradient de température et s'y condense. Le condensat revient ensuite vers la source chaude grâce au réseau capillaire et le cycle peut recommencer.

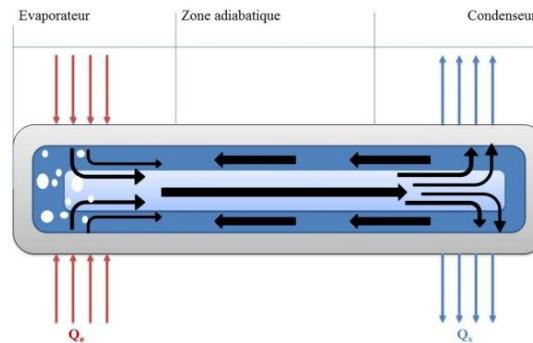


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un caloduc

3. Etude des échanges thermiques des caloducs et résistances thermiques:

On différencie les échanges thermiques des caloducs, par le type d'échanges communs (conduction, convection, rayonnement) et le principale mode d'échanges est le changement de phase ces phénomènes sont localisés dans chaque partie, on distingue :

1.1. Echange par Conduction

L'échange par conduction est présent en différents localités avec une intensité différente. En effet, un échange par conduction entre la paroi extérieure du caloduc et la surface d'évaporation ou de condensation est très inférieur à la conductance pure de changement de phase. D'où, les conductances globales d'évaporation et de condensation entre les parois et la phase vapeur sont fortement conditionnées par les phénomènes conductifs.

A l'opposé, le transfert de chaleur entre la zone de condensation et la zone d'évaporation est fortement dominé par le transfert fluïdique (transport d'énergie par mouvement de fluide). La conduction dans la paroi du caloduc représente une part très faible du transfert longitudinal.

1.2. Echange par Convection

Au sein du caloduc, les phénomènes convectifs sont en général très faibles puisque les gradients de température entre la vapeur et la surface des parois ou du liquide sont très faibles. De plus, les coefficients d'échanges pour un gaz sont faibles en regard des conductances de changement de phase. Les échanges convectifs entre la phase liquide et la paroi sont également faibles car les vitesses de la phase liquide sont faibles.

Toutefois, lorsqu'une partie de l'évaporateur est asséchée, la vapeur est directement en contact avec une paroi surchauffée. Il existe donc un gradient de température assez important pour que des échanges non totalement négligeables existent.

Les phénomènes convectifs jouent un rôle important dans les échanges au niveau de la paroi externe du condenseur puisque le flux transféré est en général cédé à un fluide

1.3. Echange par Rayonnement

Les échanges par rayonnement au sein du caloduc sont négligeables en raison des différences de températures relativement faibles dans un caloduc. De plus, les parois internes sont très peu émissives puisqu'elles sont métalliques. Même une surchauffe locale importante (20 à 30 °C) n'entraîne pas d'échange thermique par rayonnement notable par rapport au changement de phase.

Le seul cas où les échanges radiatifs sont importants concerne l'évacuation externe de la chaleur au condenseur. Dans certains cas, le refroidissement convectif n'est pas possible et le

flux transféré doit être évacué par rayonnement. On retrouve ce cas dans les applications spatiales ou pour des caloducs particuliers fonctionnant à hautes températures.

1.4. Echange par Changement de phase

De par le principe de fonctionnement du caloduc, le changement de phase est un élément essentiel dans le transfert thermique. Comme nous le verrons par la suite, le processus de changement de phase est très efficace en termes de transfert d'énergie et représente une part très faible dans les conductances globales.

1.5. Résistance thermique

Les résistances thermiques, selon la loi de Fourier, mis en équations sont :

$$R_{Th,ev} = (T_{moy,ev} - T_{moy,sat})/Q \quad (1)$$

$$R_{Th,c} = (T_{moy,sat} - T_{moy,c})/Q \quad (2)$$

$$R_{Th,a} = (T_{moy,sat,e} - T_{moy,sat,s})/Q \quad (3)$$

$$R_{Th,Total} = R_{Th,ev} + R_{Th,c} + R_{Th,a} = \frac{T_{moy,ev} - T_{moy,c}}{Q} \quad (4)$$

2. Dispositif expérimental

2.1. Description

Le dispositif expérimental (figure 2) que nous avons conçu est réalisé, et constitué de deux blocs d'aluminium à savoir :

- un premier bloc est équipé de quatre résistances électriques permettant de chauffer le caloduc, c'est le bloc chauffant qui joue le rôle de la source chaude (évaporateur) ;
- Un deuxième bloc refroidisseur permettant de refroidir le caloduc par circulation d'eau à l'aide d'une pompe.

Les blocs ainsi que le caloduc sont isolé thermiquement de l'environnement extérieur.



Figure 2 : Vue d'ensemble du dispositif expérimental

Le bloc chauffant (évaporateur) est un parallélépipède en aluminium de section $60\text{mm}^2 \times 60\text{mm}^2$ et de 30mm d'hauteur. quatre résistances chauffantes permettant de délivrer chacune une puissance de 250W et trois thermocouple type K localisé aux positions Z_1 , Z_2 , Z_3 ; permettant de mesurer la distribution axiale de la température dans ce bloc.

Le bloc refroidisseur (condenseur) est un autre parallélépipède en aluminium de mêmes dimensions que le bloc précédant, cependant, ayant un circuit de circulation d'eau froide afin de le refroidir la température de l'eau d'entrée est une consigne du bassin qui varie entre 5°C et 100°C. La mesure de la température se fait aux positions aluminium Z_6 , Z_7 , Z_8 à l'aide du thermocouple de même type.

La zone adiabatique du caloduc est comprise entre les blocs chauffant et refroidisseur est isolée thermiquement. Elle est équipée de deux thermocouples insérés en Z_4 , Z_5 .

Ainsi, la distribution de la température tout au long du caloduc est obtenus à partir des mesures fournies par au total 8 thermocouple de type K placées à 10mm, 30mm, 50mm, 80mm, 110mm, 140mm, 160mm et 180mm à partir de l'extrémité de l'évaporateur.

Les blocs évaporateur et condenseur sont montés sur un support métallique (Figure 3) tournant permettant d'étudier les performances thermiques du caloduc en fonction de sa position.

Les performance délivrées par les résistances thermiques sont contrôlées par un variateur de résistances et contrôlé en performance par le principe du diviseur de tension (ampèremètre, voltmètre).

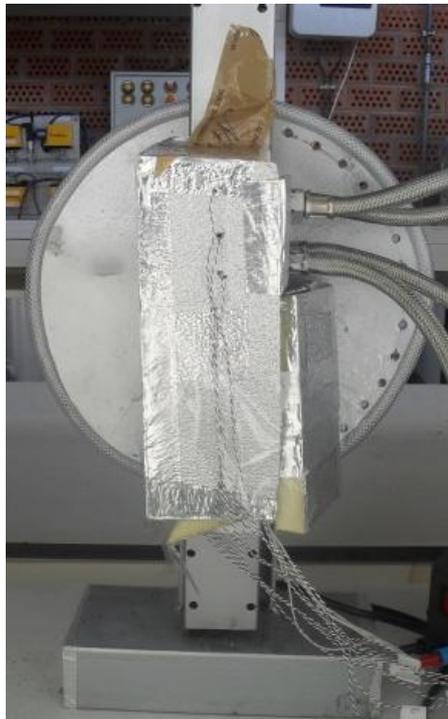


Figure 3 : Le caloduc installé sur le support tournant pour changement de positions

2.2. Méthodologie

Dans une position choisie, on fixe tout d'abord la température de l'eau de refroidissement par le cryostat (Figures 4) et ensuite on fait varier la puissance électrique imposée au niveau de l'évaporateur.



Figure 4: Photo du cryostat et son régulateur

Pour une puissance électrique imposée on prélève :

- Les températures correspondantes aux thermocouples positionnés aux points (Z_1, Z_2, \dots, Z_8) ;(Figure 5)

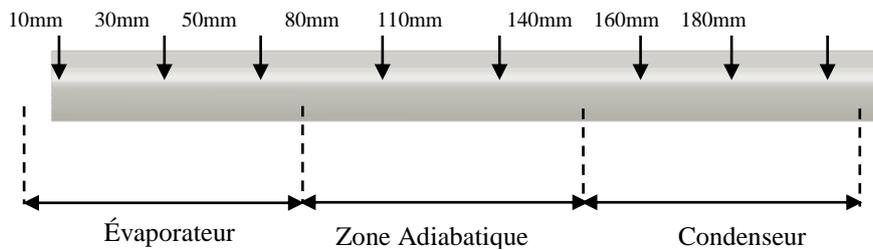


Figure 5 : Position des thermocouples le long du caloduc

- Les températures d'entrée et de sortie de l'eau ;(Figure 6)

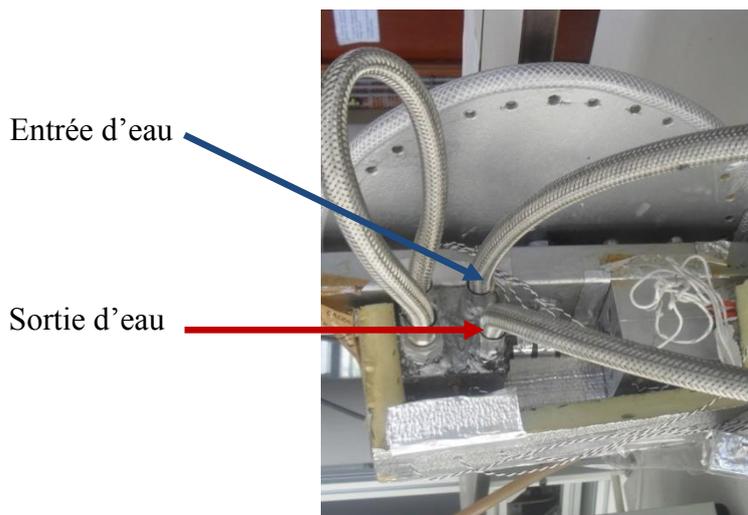


Figure 6: Circuit de refroidissement d'eau

3. Exploitations des essais et interprétations des résultats

3.1. Comportement du caloduc en régime Transitoire

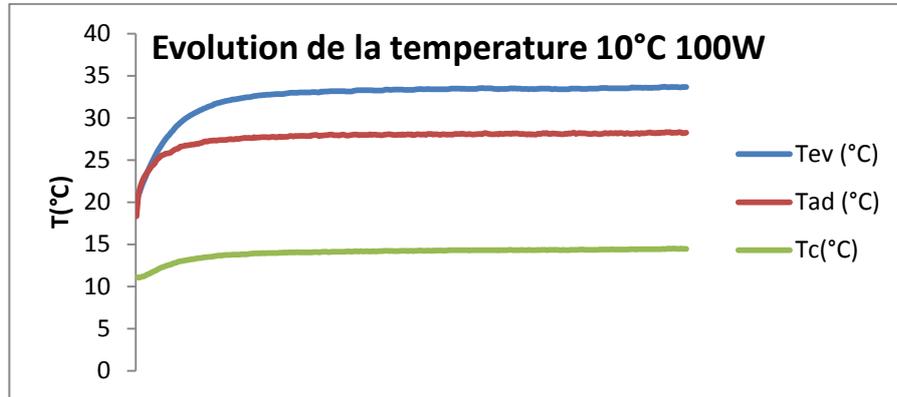


Figure 7 : Comportements de la température du caloduc en position horizontale

3.2. Effet de la puissance sur les performances thermiques du caloduc en régime permanent

3.2.1. Effet de la puissance sur la distribution axiale de la température

Dans cette partie nous présentons les essais effectués pour une température d'eau dans le bloc égale à $T_{sf} = 10^{\circ}\text{C}$, le caloduc étant monté horizontalement, sur la figure 8 sont présentées les variations des températures axiales, pour différentes puissances imposées.

Pour une puissance donnée, on distingue trois types d'évolution de la température pariétale axiale le long du caloduc. Dans la zone d'évaporation la température axiale diminue et reste pratiquement constante. Passant par la zone adiabatique à la zone de condensation la température reste constante pour diminuer dans la dernière zone.

La distribution axiale de la température dépend fortement de la puissance imposée. En effet les niveaux de température dans les zones d'évaporation et adiabatique augmentent lorsque la puissance imposée augmente. Cependant dans la zone de condensation, la température de la paroi tend vers la valeur imposée par celle de l'eau de refroidissement 10°C .

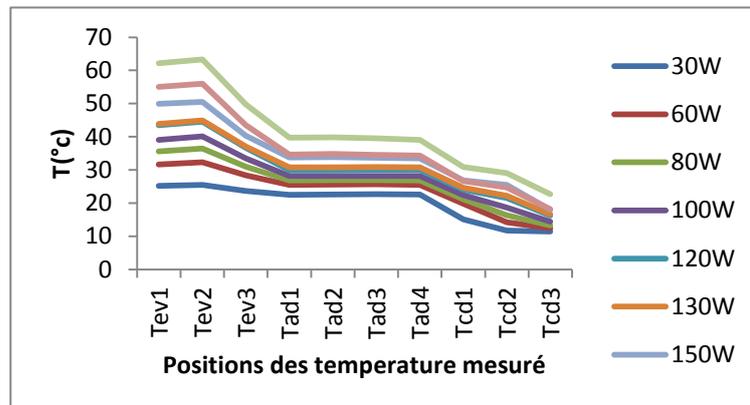


Figure 8 : Distribution axiale de la température en fonction de différentes puissances imposées

Le gradient de température de long du caloduc illustre la capacité du caloduc à transférer la chaleur dans les différentes zones. Le gradient de température est plus important lors du passage de la zone d'évaporation à la zone adiabatique. Ceci montre la résistance thermique dans cette

zone est très faible et peut être considéré comme négligeable. Au passage de la zone adiabatique à la zone de condensation, il existe un gradient de température mais reste plus faible que celui noté lors du passage de la zone d'évaporation à la zone adiabatique. Cela montre la faible résistance thermique due à la condensation.

3.2.2. Effet de la puissance sur les résistances thermiques des zones d'évaporation de condensation et adiabatique

La figure 9 montre la variation des résistances thermiques des différentes zones en fonction de la variation de puissance.

L'examen de cette figure montre que la résistance thermique $R_{th\,ev}$ augmente pour des puissances inférieures à 100W

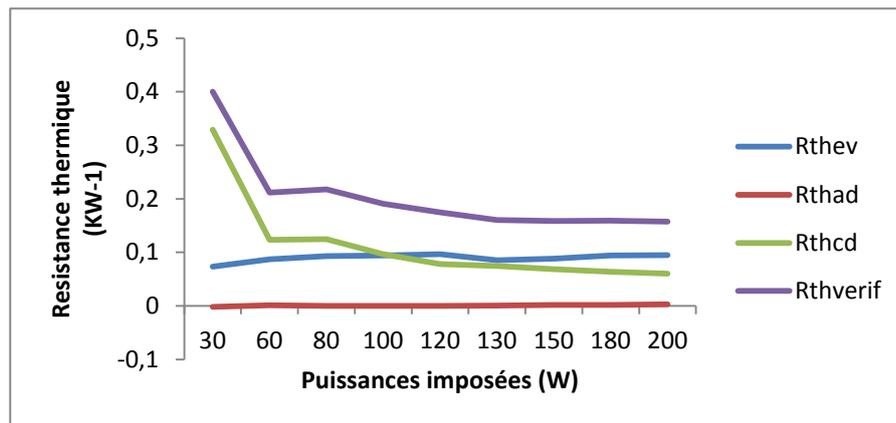


Figure 9 : Effet de la puissance sur les résistances thermiques

3.2.3. Effet de la puissance sur la résistance thermique totale du caloduc

La variation de la résistance thermique totale du caloduc sont présentés sur la figure 10.

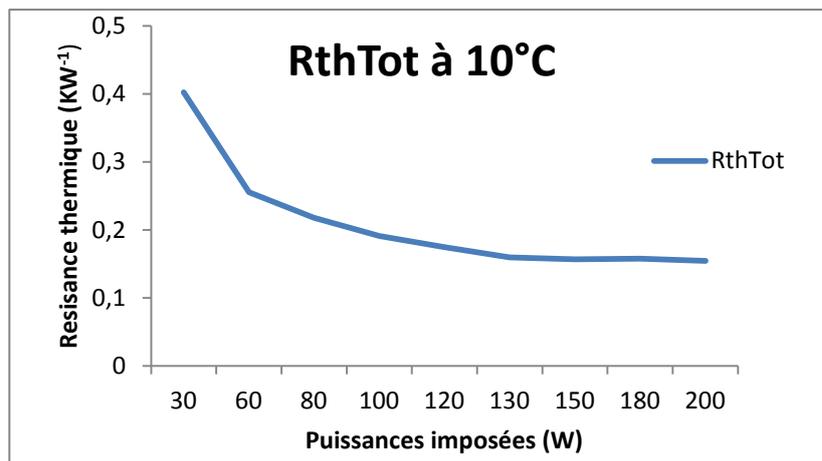


Figure 10 : Effet de la puissance sur la résistance thermique totale

Pour des puissances inférieures à 100W, la résistance augmente, au-delà de cette puissance la résistance reste constante dans cette zone le caloduc atteint la limite capillaire $Q_{max}=100W$

3.3. Influence de la position du caloduc sur ses performances thermique

Dans cette partie nous analysons les performances thermiques du caloduc en fonction de son orientation : position horizontale, thermosiphon (verticale favorable) et antigravitaire (verticale défavorable) représentées dans la figure 11.

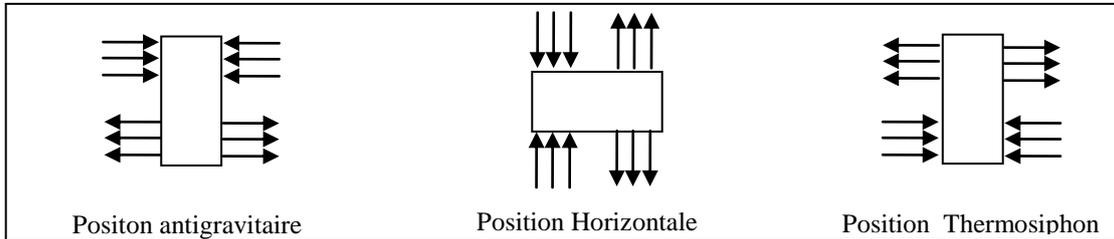


Figure 11 : Différentes positions expérimentées

Sur la figure 12 sont présentées les distributions axiales de la température pariétale (murale) du caloduc pour une seule puissance imposées 30W à une température fixée à 35°C et pour différentes variation.

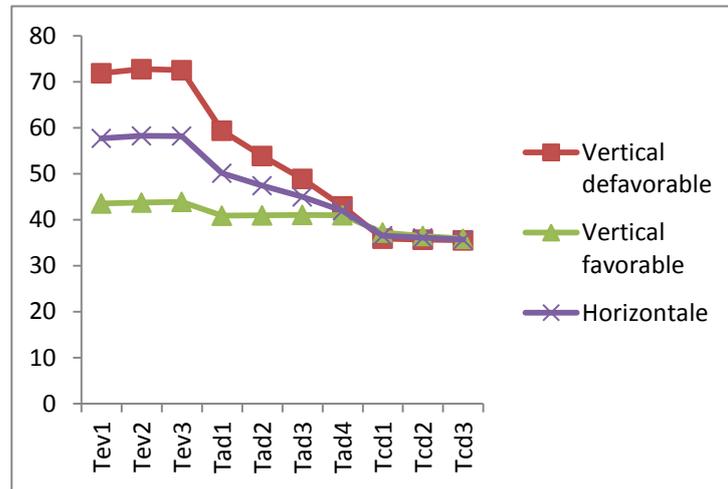


Figure 12 : Distributions axiales de température à 35°C imposées 30W

Pour la position thermosiphon la limite capillaire est repoussée et le caloduc peut transférer la chaleur plus facilement que celle de la position horizontale. Ceci s’explique par le fait que dans le cas, les forces de gravité favorisent d’avantage le retour du liquide à l’évaporateur.

Pour la position antigravitaire, la limite capillaire diminue et les puissances dissipées par le caloduc sont plus faibles que celle transférées lorsque le caloduc est orienté dans la position horizontale. Ceci s’explique par le fait que les forces de gravité s’opposent au retour du liquide à l’évaporateur et par conséquent, la limite d’assèchement est atteint pour des puissances plus faibles que celle dissipées lorsque le caloduc est testé en position horizontale.

4. Conclusion

Cette étude nous a permis de montrer les performances thermiques du caloduc pour différents conditions opératoires.

Les résultats expérimentaux montres que ces performances dépendent des certains paramètres tel que la température de la source froide, l’orientation du caloduc par rapport à la gravité. Ces résultats montrent que le caloduc est sensible vis-à-vis la gravité.

Références

61. Meysenc L., "Etude des micro-échangeurs intégrés pour le refroidissement des semi-conducteurs de puissance", Thèse de doctorat de l'INPG, février 1998.
62. Chi S.W., "Heat Pipe Theory and Practice", McGraw-Hill, 1976.
63. K.V. Paiva, M.B.H. Mantelli, L.K. Slongo "Experimental testing of mini heat pipes under microgravity conditions aboard a suborbital rocket" Aerospace Science and Technology Volume 45, September 2015, Pages 367–375
64. Salem A. Said, Bilal A. Akash. Experimental performance of a heat pipe International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 26, Issue 5, July 1999, Pages 679–684