

# Etude expérimentale de caloducs oscillants

Ahlem BENSALÉM<sup>1\*</sup>, Cyril ROMESTANT<sup>1</sup>, Yves BERTIN<sup>1</sup>, Vincent AYEL<sup>1</sup>, Jocelyn BONJOUR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Etudes Thermiques UMR 6608

1 avenue Clément Ader, B.P. 40109 – 86961 Futuroscope Cedex

<sup>2</sup>Centre Thermique de Lyon UMR 5008

Bât Sadi Carnot, 9 rue de la physique – 69621 Villeurbanne

\* (auteur correspondant : [ahlem.bensalem@let.ensma.fr](mailto:ahlem.bensalem@let.ensma.fr))

**Résumé** - Le caloduc oscillant est un système de transfert de chaleur diphasique innovant. Sa géométrie simple correspond à un serpentin formé à partir d'un tube capillaire lisse. En revanche, son comportement thermo-hydraulique est assez complexe car issu de l'entretien permanent de nombreuses instabilités responsables de son état de « non équilibre » nécessaire à son bon fonctionnement. Un banc expérimental a été développé afin d'explorer le potentiel du caloduc oscillant dans les échanges thermiques et de mettre en évidence l'influence de plusieurs paramètres caractéristiques sur son fonctionnement. Les résultats et observations issus de cette étude sont présentés dans cet article.

## Nomenclature

$Bo$	nombre de Bond	$\rho$	masse volumique, $kg \cdot m^{-3}$
$D$	diamètre, $m$	<i>Indices et exposants</i>	
$g$	gravité, $m \cdot s^{-2}$	$a$	adiabatique
$L$	longueur, $m$	$c$	condenseur
$N$	nombre de boucles	$crit$	critique
$P$	pression, $Pa$	$e$	évaporateur
$PHP$	pulsating heat pipe	$i$	intérieur
$R$	résistance thermique, $K/W$	$liq$	liquide
$TR$	taux de remplissage, %	$moy$	moyenne
$\dot{Q}$	flux thermique, $W$	$t$	total
<i>Symboles grecs</i>		$th$	thermique
$\sigma$	tension superficielle, $N \cdot m^{-1}$	$vap$	vapeur

## 1. Introduction

La gestion de l'environnement thermique d'un engin spatial est une étape clé dans sa conception. En effet, les contraintes thermiques que subit ce type de dispositifs sont très sévères. Elles sont issues d'une part de l'environnement spatial, dans lequel évolue le système, et d'autre part du flux de chaleur interne généré lors du fonctionnement de ses différents composants. La garantie de conditions thermiques optimales est alors indispensable pour assurer leur bon fonctionnement. Diverses solutions utilisant les phénomènes de conduction et de rayonnement ont été appliquées dans le domaine spatial. Cependant, les limites de ces solutions en terme de quantité de chaleur évacuée et de masse embarquée à bord des systèmes spatiaux sont rapidement atteintes. Au sein de ces engins, ces solutions ont été progressivement remplacées par des dispositifs diphasiques (caloduc, boucles diphasiques à pompage capillaire). L'intérêt grandissant pour ces dispositifs est essentiellement lié à leur grande capacité de transfert de chaleur, résultant du phénomène de changement de phase liquide-vapeur, et à leur fonctionnement entièrement passif. Depuis 1990, un nouveau système, le caloduc oscillant vient s'ajouter à cette catégorie de dispositifs. Malgré la

simplicité de son concept, le caloduc oscillant reste, à l'heure actuelle, méconnu et mal maîtrisé en raison de la complexité de son comportement thermohydraulique et de l'absence de modèles théoriques prenant en considération tous les phénomènes physiques à l'origine de son fonctionnement.

## 2. Présentation du caloduc oscillant

La structure de base d'un caloduc oscillant consiste en un serpentin réalisé à partir d'un tube capillaire enroulé en plusieurs boucles interconnectées (aller-retour) et partiellement rempli en fluide caloporteur [1,2] (Figure 1) :

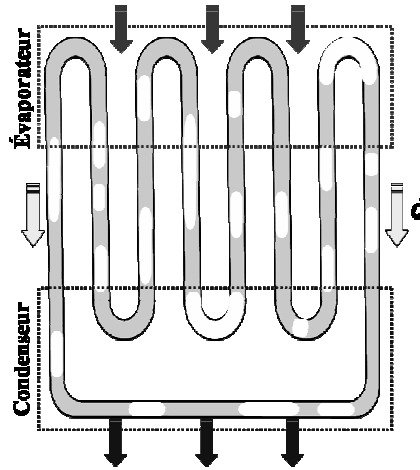


Figure 1 : Schéma d'un caloduc oscillant

Un PHP comporte au moins une zone chauffée et une zone refroidie. La zone adiabatique peut ou non exister entre l'évaporateur et le condenseur [3]. La structure poreuse tapissant l'intérieur d'un caloduc conventionnel et permettant le retour du liquide vers le condenseur est absente d'un caloduc oscillant [4].

## 3. Quelques paramètres caractéristiques

Depuis son apparition, de nombreux travaux de recherche ont été entrepris afin de comprendre et de déterminer les différents mécanismes inhérents au fonctionnement du caloduc oscillant. Les résultats issus de ces travaux n'ont pas permis de décrire précisément le comportement complexe de ce système. En revanche, ils ont permis de déterminer plusieurs paramètres (géométrie, propriétés du fluide caloporteur, conditions opérationnelles) ayant une influence sur son fonctionnement.

### 3.1. Diamètre intérieur

A l'heure actuelle, il n'existe pas de critères admis permettant de dimensionner un PHP. Seul son diamètre intérieur peut être choisi en utilisant la relation (1) exprimant le lien, à travers le nombre adimensionnel de Bond, entre le diamètre critique du capillaire et les forces mises en jeu lors de la répartition du fluide caloporteur au sein du PHP [5]. Cette répartition, sous forme de poches de vapeur et de bouchons de liquide caractéristique du fonctionnement du caloduc oscillant, implique que le nombre de Bond soit inférieur ou égal à une valeur

critique ( $Bo_{crit} \approx 2$ ) issue de la théorie d'ascension d'une bulle cylindrique à travers un liquide stagnant dans un canal [3].

$$Bo = D \sqrt{\frac{g(\rho_{liq} - \rho_{vap})}{\sigma}} \quad \text{d'où} \quad D_{crit} \approx 2 \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_{liq} - \rho_{vap})}} \quad (1)$$

Le fonctionnement et les performances d'un PHP sont extrêmement sensibles au choix de son diamètre intérieur par rapport au diamètre critique. En effet, un diamètre intérieur supérieur conduit à une réduction de l'effet de la tension de surface et à une stratification des deux phases liquide et vapeur. Le fonctionnement en mode « pulsating » est alors impossible. En revanche, si le diamètre intérieur est inférieur ou égal au diamètre critique, la tension de surface devient prépondérante par rapport à la gravité, et la formation des bulles de vapeur et des bouchons de liquide est alors garantie [4]. Il faut noter qu'une valeur trop faible du diamètre intérieur devant le diamètre critique entraîne cependant une dégradation des performances du système [3].

### 3.2. Taux de remplissage

Le fonctionnement d'un caloduc oscillant dépend aussi de la quantité de fluide caloporteur présent à l'intérieur du tube capillaire car il n'est possible que si le PHP est partiellement rempli [3]. Il existe alors deux limites à son fonctionnement selon le taux de remplissage TR défini par le rapport entre le volume du liquide et le volume total du tube capillaire. La première limite correspond à  $TR = 0\%$ . Dans ce cas la chaleur est uniquement transférée par conduction dans la structure du caloduc oscillant. La seconde limite correspond à  $TR = 100\%$  : la circulation du liquide est alors générée par la différence de masse volumique, liée au gradient de température, conduisant ainsi à un transfert d'énergie par chaleur sensible. L'augmentation du taux de transfert thermique au sein de ce système passe nécessairement par l'introduction d'un régime d'écoulement diphasique permettant l'exploitation de la chaleur latente de changement de phase dans les échanges thermiques [3]. La gamme de taux de remplissage pour laquelle un PHP fonctionne en mode « pulsating » est comprise entre 20% et 80%. Lorsque le taux de remplissage est faible le nombre de bulles de vapeur, moteur de la circulation du fluide dans le système [2], est important. Cependant, le transfert thermique par chaleur sensible est réduit en raison de la faible quantité de liquide contenue dans le PHP. En revanche, si le taux de remplissage est important, le nombre de bulles de vapeur est faible. Le pompage du liquide, grâce aux fluctuations de pression, est par conséquent réduit et les performances du système se dégradent. Il existe alors un taux de remplissage **optimal**, voisin de 50%, pour un caloduc oscillant donné [3].

## 4. Dispositif expérimental

Un banc d'essai a été développé. Il s'agit un caloduc oscillant fabriqué à partir d'un tube capillaire lisse en cuivre. Ce tube capillaire a été enroulé autour de deux blocs de cuivre correspondant à l'évaporateur et au condenseur et permettant localement une meilleure diffusion de la chaleur. Ce caloduc oscillant comporte également une zone adiabatique comme le montre la figure 2 :

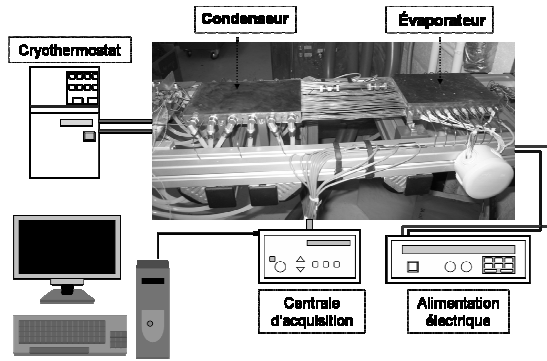


Figure 2 : Le caloduc oscillant en cours de montage

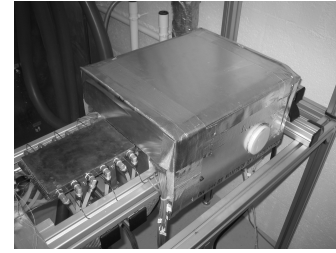


Figure 3 : Isolation de l'évaporateur et de la zone adiabatique

Les dimensions caractéristiques de ce PHP sont résumées dans le tableau 1 :

$D_i$	$N$	$L_e$	$L_a$	$L_c$	$L_t$
mm		mm	mm	mm	m
1,2	40	180	190	200	46,5

Tableau 1 : Dimensions géométriques du PHP

L'injection d'un flux de chaleur à l'évaporateur se fait à l'aide de 9 résistances électriques chauffantes insérées dans le bloc de cuivre. L'extraction de cette énergie injectée est effectuée au niveau du condenseur dont la température est régulée à l'aide d'un circuit de refroidissement liquide relié à un cryothermostat.

Ce banc d'essai a été muni de 24 thermocouples de type K permettant de mesurer l'évolution temporelle ainsi que la répartition des températures à l'évaporateur et au condenseur. Ces thermocouples ont été répartis comme le présente la figure 4 :

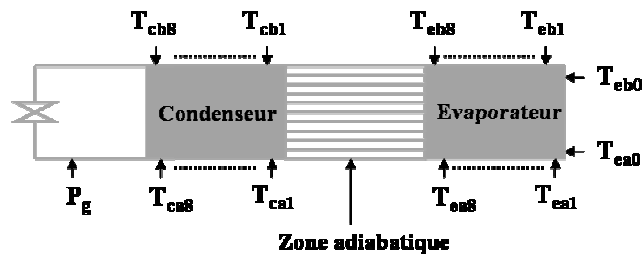


Figure 4 : Répartition des thermocouples

Outre la mesure de la température, un capteur de pression absolue ( $P_g$ , 0-2bars) a été installé sur la dernière boucle du caloduc oscillant permettant, d'une part, de suivre les fluctuations de pression et, d'autre part, de détecter l'introduction de gaz incondensables dans le PHP.

Afin de s'affranchir de l'effet de l'ambiance sur les résultats des essais et de s'assurer que la quasi-totalité de la puissance thermique appliquée à l'évaporateur est évacuée par le système, l'évaporateur et la zone adiabatique ont été entièrement isolés du milieu extérieur à l'aide d'isolants haute température (Figure 3).

## 5. Résultats et observations

Au début de chaque essai, quatre paramètres sont connus : la nature du fluide caloporteur utilisé, le taux de remplissage, l'orientation par rapport à l'horizontale et la température du condenseur imposée par le cryothermostat. Tous les essais ont été réalisés, en configuration ouverte, en utilisant l'eau comme fluide caloporteur.

### 5.1. Capacité de transfert de chaleur du caloduc oscillant

Les premiers essais réalisés ont été consacrés à la caractérisation des performances du caloduc oscillant en évaluant sa puissance thermique maximale transférable enregistrée sous diverses conditions opérationnelles. Ces performances ont été mesurées en calculant la résistance thermique globale du système à l'aide de la relation suivante :

$$R_{th} = \frac{\dot{Q}}{T_{e\_moy} - T_{c\_moy}} \quad (2)$$

$T_{e\_moy}$  et  $T_{c\_moy}$  sont les moyennes arithmétiques des températures relevées respectivement à l'évaporateur et au condenseur. Les résultats, présentés sur la figure 5, ont été enregistrés lors de quatre essais différents. Ces essais ont été tous réalisés en fixant TR à 50% et 60% et l'angle d'inclinaison à 0°. En revanche, la température de la source froide a été modifiée pour chaque essai (60°C, 70°C, 80°C et 90°C). Les courbes de la figure 5 montrent une diminution progressive de la résistance globale du système à mesure que la puissance thermique injectée augmente (100W à 1000W). Cependant, la résistance thermique globale, calculée pour les puissances thermiques supérieures à 1kW, devient sensiblement constante. Ces résultats révèlent également un important potentiel de transfert de chaleur du caloduc oscillant (des puissances de l'ordre de 2kW ont été enregistrées). Les meilleures performances ont été enregistrées pour une température de source froide de 60°C pour TR = 60% et de 80°C pour TR = 50%. L'analyse de cette observation sera effectuée grâce à des essais complémentaires de reproductibilité et de mise en évidence de l'effet des propriétés du fluide caloporteur.

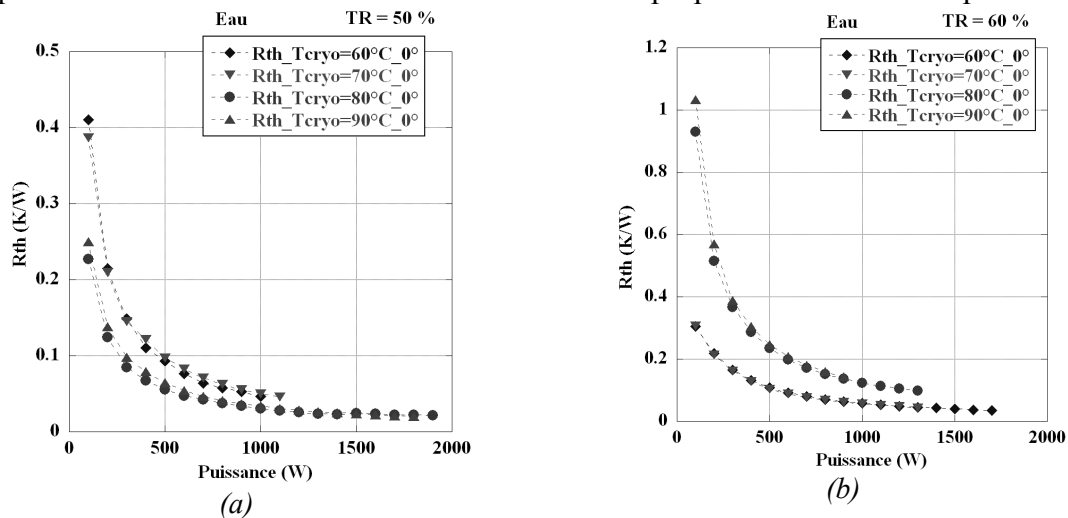


Figure 5 : Variation de la résistance thermique en fonction de la puissance, a : TR = 50% ; b : TR = 60%

Les limites de puissance thermique transférée par le PHP avant décrochage n'ont pas été atteintes car la température de l'évaporateur dépasse 150°C, limite de sécurité matérielle, impliquant l'arrêt du système de chauffage.

### 5.2. Effet de la gravité sur le fonctionnement du caloduc oscillant

L'effet que peut avoir la gravité sur les performances du caloduc oscillant est déterminant dans le choix des applications industrielles potentielles et en particulier dans le domaine spatial. Dans la littérature, les conclusions et observations formulées concernant l'effet de ce paramètre divergent.

Dans cette étude expérimentale, des tests visant à mettre en évidence l'effet de la gravité sur le fonctionnement du PHP ont été réalisés. La variation de la résistance thermique globale

du système en fonction du flux de chaleur appliqué à l'évaporateur a été enregistrée pour trois orientations, à savoir 0° (horizontale), +90° (verticale favorable), -90° (verticale défavorable). Les résultats de la figure 6 montrent que le fonctionnement du PHP est possible quelle que soit son orientation. On retrouve sensiblement les mêmes valeurs de  $R_{th}$  pour chacune des puissances considérées. Mentionons que à faible puissance (100W) la gravité semble améliorer la capacité thermique globale du système. Cependant, cet effet semble inexistant dans le cas de puissances thermiques plus importantes.

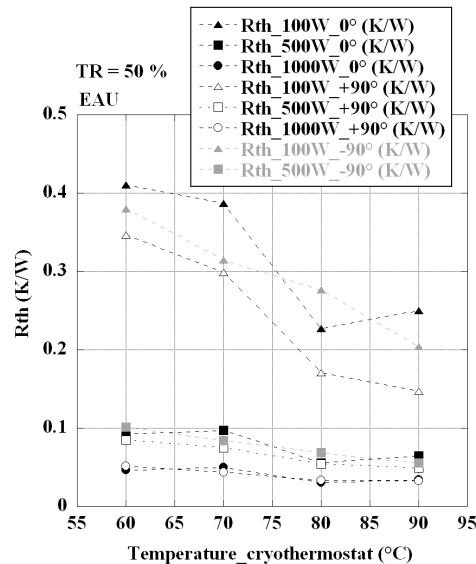


Figure 6 : Variation de la résistance thermique en fonction de température de la source froide et de l'angle d'inclinaison

## 6. Conclusion

Cet article présente une étude expérimentale réalisée dans l'objectif d'améliorer la caractérisation et la connaissance du fonctionnement complexe d'un caloduc oscillant. A cet effet, un banc d'essai a été développé et plusieurs séries d'expériences ont été réalisées. Les premiers résultats obtenus mettent en évidence une importante capacité de transfert de chaleur du caloduc oscillant due au mouvement oscillatoire du fluide caloporteur au sein du système. En outre, le fonctionnement du PHP reste possible même en conditions défavorables pour lesquelles la gravité freine le retour du liquide vers l'évaporateur.

Cette étude expérimentale sera poursuivie par la réalisation de nombreux essais visant à étudier plus largement l'effet des propriétés thermophysiques du fluide caloporteur et du taux de remplissage du PHP sur son fonctionnement.

### Références

- [1] Y. Miyazaki, F. Polasek, H. Akachi, Oscillating heat pipes, SAE Technical Paper series 2000-01-2375, 30th Int. conference on environmental systems, (july 2003).
- [2] A. Bensalem, C. Romestant, A. Alexandre, Y. Bertin, M. Lallemand, Comportement thermohydraulique d'un caloduc oscillant, Congrès SFT (île de Ré 16-19 mai 2006), vol.1, 69-75
- [3] S. Khandekar, Thermo-hydrodynamics of closed loop pulsating heat pipes, Thèse de Doctorat, (University of Stuttgart, 2004).
- [4] M. B. Shafii, A. Faghri, Y. Zhang, Thermal modeling of unlooped and looped pulsating heat pipes, Journal of heat transfer, (december 2001), Vol.123, 1159-1172.
- [5] R. R. Riehl, Characteristics of an open loop pulsating heat pipe, Proc. of the 34th international conference on environmental systems. (Colorado Springs USA, 19-24 july. 2005), 2004-01-2909

### Remerciements

Les auteurs de l'article tiennent à remercier le CNES de Toulouse partenaire de cette étude.