

Modélisation du comportement thermique d'un caloduc oscillant plat : approche par méthode inverse

Thibault VAN'T VEER^{1,2*}, Vincent AVEL², Mouad DINY¹, Etienne VIDECOQ², Yves BERTIN²

¹ Stellantis – Site de Carrières sous Poissy, 78955 Carrières-sous-Poissy, France

² Pprime Institute CNRS – ENSMA – Université de Poitiers, UPR 3346, 86961 Futuroscope-Chasseneuil, France

* (Auteur correspondant : thibault.vantveer@stellantis.com)

Résumé - Les caloducs oscillants demeurent des systèmes complexes au comportement thermohydraulique chaotique, et la simulation par des modèles prédictifs n'est pas encore rendue possible même au premier ordre. C'est pourquoi cette étude propose d'étudier, par une méthode inverse simple, le comportement thermique d'un caloduc oscillant plat à partir de données expérimentales fournies par thermographie infrarouge. Il est alors possible de mettre en avant un profil de conductivité thermique associé à la géométrie du caloduc, offrant la possibilité d'exploiter les résultats expérimentaux dans un modèle global de gestion thermique.

Nomenclature

FR	taux de remplissage, -	z	hauteur adimensionnée, -
k	conductivité thermique, W/m/K	<i>Indices et exposants</i>	
R_{th}	résistance thermique, K/W	eff	effective
Q	puissance thermique, W	$pertes$	pertes thermiques
S	terme source, W/m ³	ev	évaporateur
T	température, K	cd	condenseur

1. Introduction

Parmi les solutions techniques connues et appliquées pour la gestion thermique de composants dissipatifs, les systèmes diphasiques passifs, et plus communément les caloducs, présentent de nombreux avantages par rapport à d'autres systèmes plus lourds (conduction...) ou plus complexes (systèmes actifs...). En effet, qualifiés de passifs, ils ne consomment pas d'énergie autre que la source de chaleur à refroidir pour fonctionner en toute autonomie. Ils sont divisés en trois grandes familles que sont : les caloducs et thermosiphons, les boucles diphasiques à pompage capillaire et les caloducs oscillants. Ils présentent des performances généralement attractives (jusqu'à 300 W/cm² selon le système considéré) et peuvent être miniaturisés pour intégrer le refroidissement des composants électroniques par exemple (μ -processeur, IGBT...).

Moins répandu et toujours au stade de recherche, le caloduc oscillant est particulier pour son fonctionnement et son comportement thermohydraulique pour le moins stochastique. Simple dans sa géométrie (Figure 1), la succession de bouchons liquides et de poches de vapeur, situés dans un canal (ou un tube) de dimensions capillaire et enroulé de multiples fois autour de sources chaude et froide, entraîne la réunion de phénomènes physiques complexes et multi-échelles : convection monophasique de la phase liquide, ébullition, dépôt d'un film liquide microscopique en aval des ménisques récessifs étant le lieu de phénomènes d'évaporation ou

condensation intenses selon la source associée, ou encore évaporation de la ligne de contact (ligne triple).

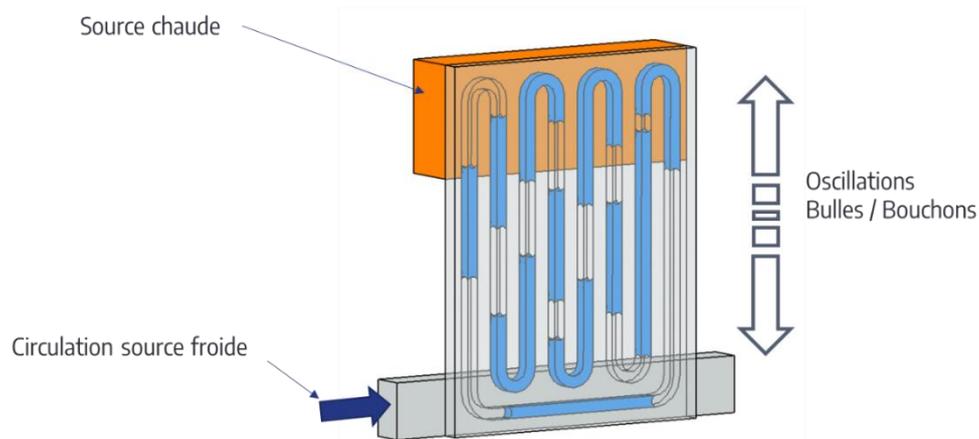


Figure 1 : Vue 3D d'un caloduc oscillant plat

Par une approche nodale simple, les performances thermiques des caloducs oscillants sont généralement caractérisées expérimentalement par une résistance thermique (R_{th}) dont la valeur dépend des conditions opératoires (nature du fluide, taux de remplissage, orientation, température de source froide, etc.) et varie en fonction de la puissance transférée. Cette méthodologie offre l'avantage d'être rapide et donne une première évaluation du potentiel du caloduc oscillant en tant que système de refroidissement. Ainsi, avec la géométrie du caloduc la notion de conductivité équivalente est introduite. Soit avec la longueur totale du caloduc [Kwon-15], soit avec la longueur de la zone adiabatique [Kamijima-20]. Des travaux sur un caloduc tubulaire incorporé dans un châssis métallique ont montré une démarche différente pour identifier la conductivité thermique équivalente par utilisation de la thermographie infrarouge [Hemadri-11]. Cette étude est néanmoins limitée par d'importants effets de bord qui rendent compliquée l'identification de la conductivité équivalente. Néanmoins, pour chaque cas de figure, la conductivité thermique équivalente est considérée constante suivant la longueur du caloduc, et sa valeur dépend de la puissance injectée. Par exemple, $k_{eff} = 2300$ W/m/K pour une puissance de 150 W pour le caloduc oscillant de [Hemadri-11] avec une longueur caractéristique de 250 mm (tube circulaire de diamètre intérieur de 2 mm, éthanol comme fluide de travail, et $FR = 60\%$). La figure 2 suivante montre une comparaison d'un thermogramme expérimental avec une simulation numérique pour ce cas de figure.

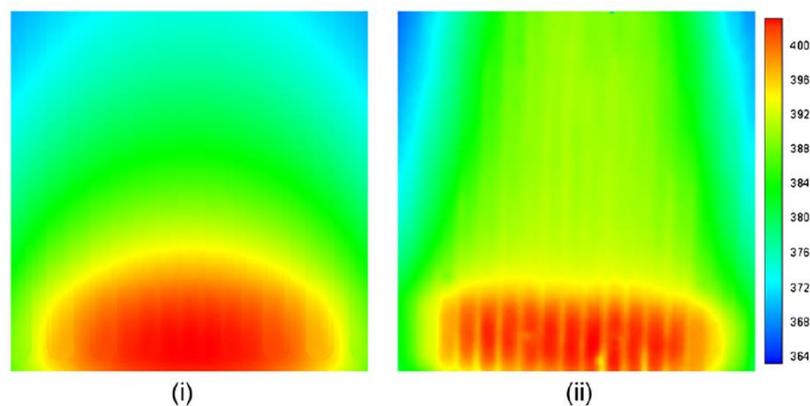


Figure 2 : Comparaison entre des résultats de simulation (i) et expérimentaux (ii) pour une puissance de 150 W ($k_{eff} = 2300$ W/m/K). [Hemadri-11]

2. Mesures expérimentales

2.1. Dispositif expérimental

La Figure 3 montre le caloduc oscillant installé en position verticale, avec la face avant peinte en noire pour contrôler son émissivité ($\varepsilon = 0,95, \pm 0.02$). Les dimensions extérieures du caloduc sont $94 \times 108 \text{ mm}^2$ avec un canal interne rectangulaire de dimension $0,5 \times 0,8 \text{ mm}^2$. Les sources chaude et froide sont disposées sur la face arrière du caloduc. Une isolation thermique est assurée par 5 cm de laine de roche ($k = 0,04 \text{ W/m/K}$). Six films chauffants de type Kapton-KHLVA (10 W/in^2) disposés en trois colonnes sont régulés via le logiciel LabVIEW® par trois alimentations ELC-ALR3206D. La source froide du caloduc est assurée par la circulation d'eau glycolée régulée en température par un cryothermostat (Huber CC415). Le débit de fluide caloporteur est piloté via une vanne de régulation et un débitmètre à ultrason (FD-XC20R2 de chez Keyence).

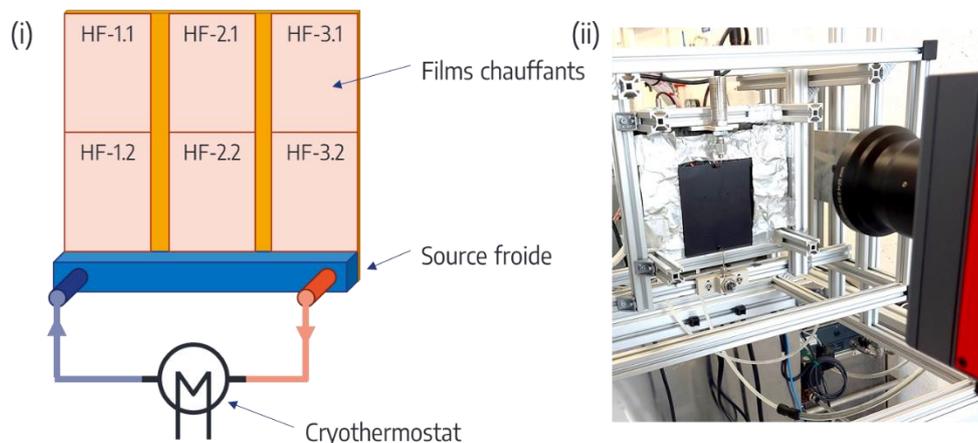


Figure 3 : *Dispositif expérimental : (i) représentation schématique de l'arrière du caloduc avec les sources chaude et froide et (ii) vue de la face avant peinte en noire du caloduc oscillant dans son châssis, avec isolation, capteur de pression (en haut) et caméra infrarouge (premier plan)*

Les températures d'entrée et sortie de la source froide sont mesurées par l'intermédiaire de thermocouples de type T ($\pm 0.8 \text{ K}$), tout comme pour la température ambiante. Le champ de température de la face avant du caloduc est mesuré au moyen d'une caméra infrarouge (Infratec® 9450 ; résolution spatiale 1280×1024 ; précision spatiale $\pm 1 \text{ K}$; résolution temporelle $\pm 0,03 \text{ K}$ à 30°C).

2.2. Résultats expérimentaux

Durant les essais, la température de la zone condenseur est maintenue constante à 20°C au moyen du cryothermostat. Côté zone évaporateur, des films chauffants sont utilisés pour fournir la puissance thermique. Des échelons croissants de puissance de 15 W au total sont successivement imposés au niveau des six films chauffants. La caractérisation thermique est effectuée en régime stationnaire : dès que le caloduc oscillant est considéré stable thermiquement (c'est-à-dire dont le niveau de température moyen ne varie plus avec le temps, sachant que le transfert de chaleur se fait par fluctuations de températures du fait des mouvements de fluides définis en introduction comme chaotiques), le système est supposé dans un mode de fonctionnement « pseudo-stationnaire » et les mesures infrarouges peuvent débuter. Afin de limiter la taille des fichiers d'acquisition, la plage de mesure infrarouge est de 300 s à une fréquence de 1 Hz (adaptée aux phénomènes instables d'évaporation et condensation).

Deux séries d'essai servent de donnée d'entrée pour cette étude. Le caloduc est rempli avec un fluide de travail (ici le réfrigérant R1233zde) avec deux taux de remplissage (FR , Filling Ratio) fixés à 30% et 50%. Pour un tel système, le taux de remplissage est défini comme le rapport entre le volume occupé par la phase liquide sur le volume total interne des canaux. Il conditionne alors la masse de fluide initiale à introduire à l'intérieur du caloduc oscillant.

Pour chaque échelon de puissance, les images infrarouges sont moyennées dans le temps pour donner un thermogramme moyen. La Figure 4 (i) montre un thermogramme moyenné pour une consigne de puissance de 45 W, ainsi qu'un premier graphe (Figure 4 (ii)) affichant l'évolution des températures pour trois points situés dans la zone évaporateur ($T_{ev,1}$ à 3) et condenseur ($T_{cd,1}$ à 3), représentés par les croix sur la Figure 4 (i), pendant la durée d'acquisition (300 s) ; un second graphe (Figure 4 (iii)) présente trois profils de température ($HF-1$ à 3) extraits sur la hauteur du caloduc entre la source froide (en bas) et la source chaude (partie haute). La hauteur du caloduc est adimensionnée, et la convention a été prise d'avoir la partie basse du condenseur à $z = 0$ et le haut de la zone évaporateur à $z = 1$.

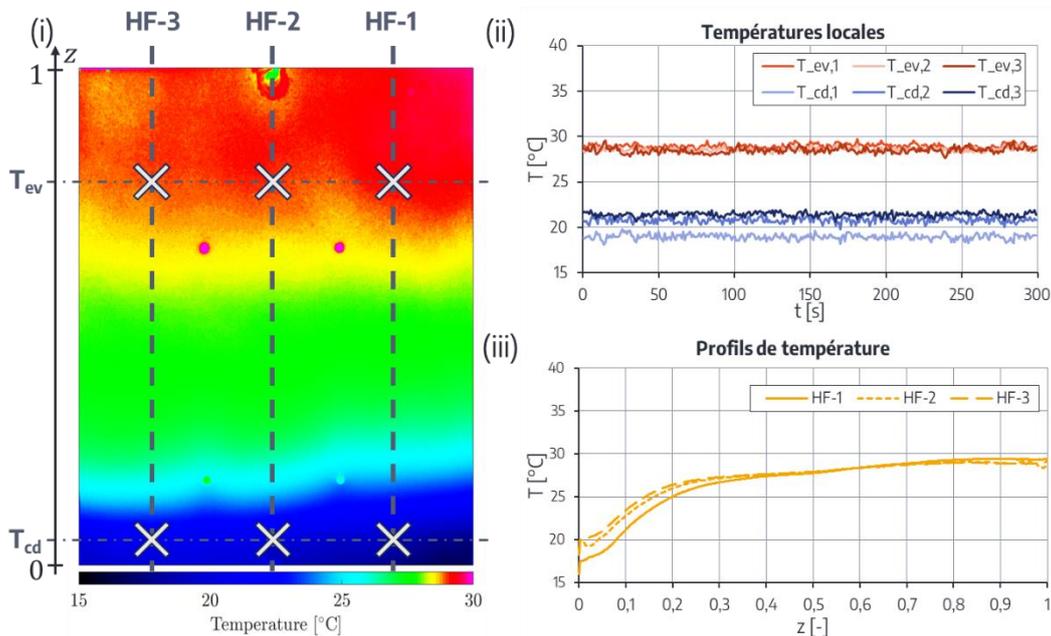


Figure 4 : Analyse d'un essai à 45 W ($FR = 30\%$) : (i) Thermogramme moyenné avec la mise en évidence des trois profils de température ; (ii) évolution des températures sur la durée de l'essai et (iii) profils de température extraits sur la hauteur du caloduc en régime permanent

3. Résolution par méthode inverse

3.1. Enoncé du problème

L'objectif ici est d'identifier la conductivité thermique équivalente locale du caloduc, c'est-à-dire obtenir un profil de conductivité thermique qui dépend de la hauteur z . Etant donné que le champ de température est relativement homogène dans la seconde dimension (Figure 4 (i)), et que le caloduc est suffisamment mince pour considérer sa température uniforme selon son épaisseur, le problème sera traité uniquement en 1D suivant la dimension verticale z . Les mesures expérimentales ayant été réalisées dans un mode « pseudo stationnaire », le problème est considéré stationnaire. La résolution se fait par résolution de l'équation de la chaleur, où la conductivité thermique, $k(z)$, est l'inconnue. Pour ce problème 1D, les conditions aux limites

sont un flux thermique positif imposé au niveau de la zone évaporateur ($z > 0,07$) et deux flux thermiques négatifs (zone condenseur et pertes thermiques sur toute la longueur). Concernant les conditions initiales, la température est fixée constante à la température de la source froide sur toute la longueur du caloduc. L'équation de la chaleur associée aux différentes hypothèses s'écrit ainsi :

$$\frac{\partial k(z)}{\partial z} \frac{\partial T(z)}{\partial z} + k(z) \frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} + S = 0 \quad (1)$$

Avec $T(z)$ la température issue du post-traitement des données expérimentales et S le terme source dépendant des conditions aux limites.

La principale difficulté ici est l'utilisation des données expérimentales pour évaluer la température et sa dérivée seconde. Bien que les mesures aient été réalisées par thermographie infrarouge, le champ de température laisse apparaître un léger bruit de mesure qui s'accroît avec les dérivées successives. Filtrer le signal n'est pas concluant, cela entraîne un déphasage et une perte d'information. Il a été choisi d'approximer le profil de température expérimental par une fonction analytique continue sur le domaine d'étude. Classique, mais instable aux extrémités du domaine, l'approximation par des polynômes ne donne pas de résultat concluant. À la suite de ces observations et à la vue des profils de température de la Figure 4 (iii), le choix s'est orienté vers la somme de deux exponentielles (eq. (2)). Cette relation mathématique, toujours croissante, offre deux avantages principaux : de ne dépendre que de quatre paramètres (A_0 , A_1 , z_1 , et z_2) qui permettent une méthode rapide (moindres carrés non linéaire) pour approximer les données expérimentales et de respecter les pentes horizontales à l'origine et à $z = 1$.

$$\tilde{T}(z) = A_0 + A_1 \left(1 - \frac{1}{z_1 - z_2} \left(e^{-\frac{z}{z_1}} - e^{-\frac{z}{z_2}} \right) \right) \quad (2)$$

où A_0 , A_1 , z_1 , et z_2 sont des constantes à déterminer pour chaque profil de température.

3.2. Résolution

L'approximation des profils de température par le modèle mathématique prédéfini est résolue avec le logiciel Matlab®, à l'aide de la fonction « fit ». La Figure 5 montre, pour la série d'essai avec un taux de remplissage de 50%, les profils de température expérimentaux superposés au profil approximé (eq. (2)) pour des puissances allant de 15 à 75 W. À noter que, pour la puissance à 15 W, le caloduc ne s'est pas comporté comme un caloduc oscillant : il n'a pas démarré, ce qui s'est traduit par un blocage des oscillations et donc un équilibre des pressions entre les différentes poches de vapeur. Par conséquent ce profil de température est typique d'une courbe de conduction pure le long de la plaque en cuivre chauffée. Concernant les autres profils de température (pour des puissances thermiques Q supérieures à 30 W), les oscillations caractéristiques du fluide de travail mettent en avant les performances du caloduc, notamment par l'homogénéité du champ de température dans la zone évaporateur à partir de $z = 0,4$. Le transfert de chaleur via le fluide prend le dessus sur le transfert par conduction le long de la structure.

Ensuite, à partir de la forme analytique du profil de température et de sa dérivée seconde, l'équation de la chaleur (eq. (1)) est résolue en utilisant un schéma de résolution classique par la méthode d'Euler implicite d'ordre 1.

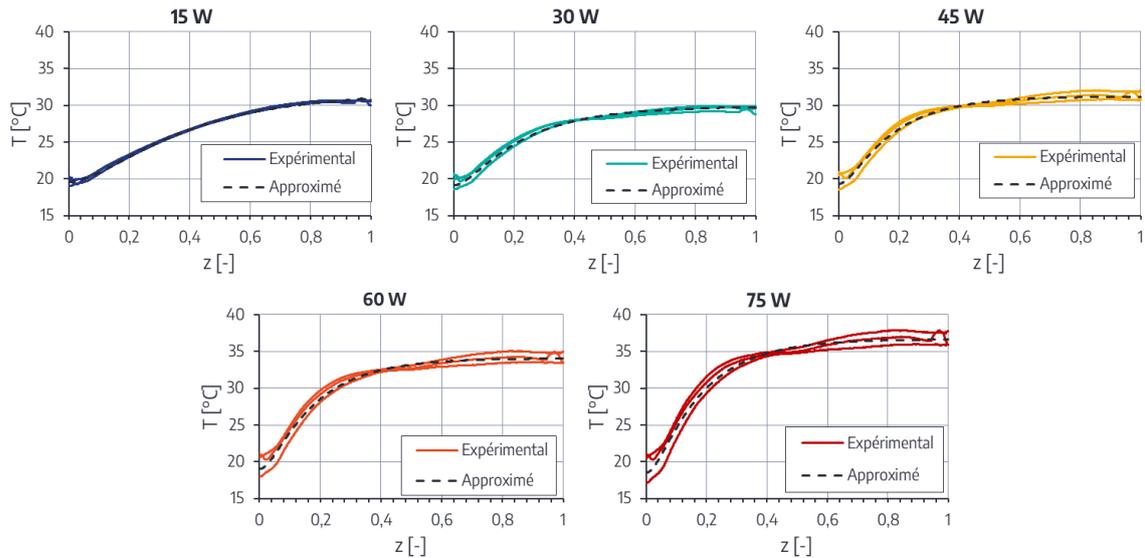


Figure 5 : Profils de température expérimentaux et approximés pour la série d'essai à $FR = 50\%$

3.3. Profils de conductivité thermique

L'identification du profil longitudinal de conductivité thermique a été menée pour les deux taux de remplissage (30% et 50%) pour les puissances allant de 15 W à 75 W. Les différents profils de conductivité sont comparés sur la Figure 6. Plusieurs points sont à souligner :

- Les résultats obtenus n'ont pas de sens physique dans la mesure où, pour un système diphasique, la notion de conductivité thermique ne représente en rien les échanges associés aux mouvements chaotiques et nombreux phénomènes (convection, évaporation, condensation) du fluide de travail. C'est notamment visible sur la Figure 6 lorsque, à la limite du système (z proche de 1), la conductivité devient négative.
- Le cas particulier à $Q = 15$ W pour le taux de remplissage de 50%, lorsque le caloduc ne fonctionne pas, ne montre pas une conductivité constante de 390 W/m/K comme ce serait le cas pour de la conduction pure. Cela provient, entre autres de l'incertitude des données expérimentales, des effets de bords et des conditions limites du modèle qui sont appliquées au niveau des sources chaude et froide et ne sont pas complètement fidèles aux conditions expérimentales.
- Concernant l'évolution des profils de conductivité, ils sont croissants sur l'intervalle $z = 0$ à 0,8, traduisant le fait que le champ de température, et donc le profil de température associé, est de plus en plus uniforme avec la puissance dans la zone évaporateur, selon l'axe vertical. Cela démontre un transfert quasi total de la densité de puissance injectée à la source chaude vers le bas du caloduc par le biais des échanges entre le fluide et la paroi directement. En revanche, au-delà de $z = 0,8$, la densité de puissance à évacuer vers le bas du caloduc par sa section transversale diminue, conduisant alors à une diminution nette de la conductivité thermique apparente.
- Pour finir, malgré les différences observées pour les deux taux de remplissage sur la Figure 6, les profils de conductivité thermique montrent des évolutions tout à fait similaires. Seule la valeur maximale semble dépendre de la puissance et des performances thermiques du caloduc (voir les courbes de résistances thermiques visibles sur la Figure 7). En effet, lorsque la résistance thermique se stabilise vers une asymptote en-deçà de 0,2 K/W, les profils de conductivité thermique sont semblables quels que soient la puissance et le taux de remplissage (courbes oranges et rouges sur la Figure 6).

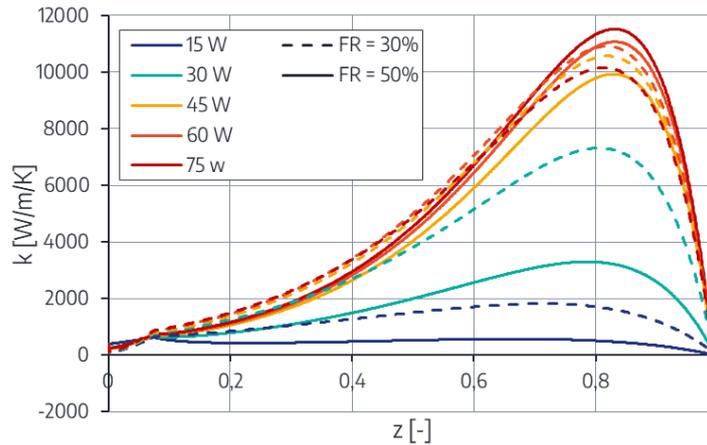


Figure 6 : Profils de conductivité thermique équivalente suivant la hauteur du caloduc oscillant plat pour deux taux de remplissage pour une puissance allant de 15 à 75 W

$$R_{th} = \frac{\bar{T}_{ev} - \bar{T}_{cd}}{Q - Q_{pertes}} \quad (3)$$

Où \bar{T}_{ev} et \bar{T}_{cd} sont les températures moyennes de la zone évaporateur et condenseur.

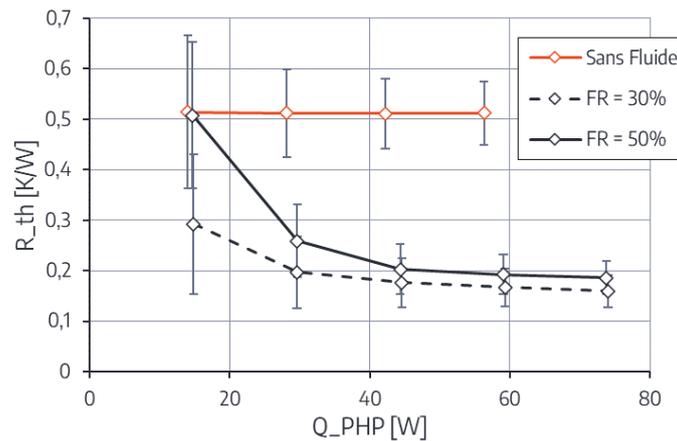


Figure 7 : Résistances thermiques associées aux résultats expérimentaux de la Figure 6 pour les taux de remplissage de 30% et 50%

4. Simulation numérique

Par l'intermédiaire d'une modélisation 3D par éléments finis du dispositif expérimental effectuée avec le logiciel GT-suite®, les profils de conductivité équivalente ainsi calculés permettent de simuler le comportement thermique du caloduc plat. Les conditions limites, identiques aux conditions expérimentales, sont appliquées aussi bien au niveau de la source chaude que de la source froide. Le thermogramme (ii) de la Figure 8 est un exemple de point d'essai simulé en intégrant le profil de conductivité thermique extrait auparavant (Figure 6). Sa comparaison avec le thermogramme expérimental (i) montre que les champs de températures sont relativement proches. Les profils de température présents sur le graphe (iii) mettent en avant un léger écart au niveau de $z = 0,5$, principalement dû au modèle mathématique utilisé pour approximer le profil de température expérimental (éq. (2)). En effet, ce modèle ne prend pas en compte le passage d'un premier plateau homogène à un second à $z = 0,5$, comme on le voit sur les courbes expérimentales de la Figure 5. Dans ce cas, l'erreur maximale entre le champ de température simulé et expérimental ne dépasse pas $1,3^{\circ}\text{C}$.

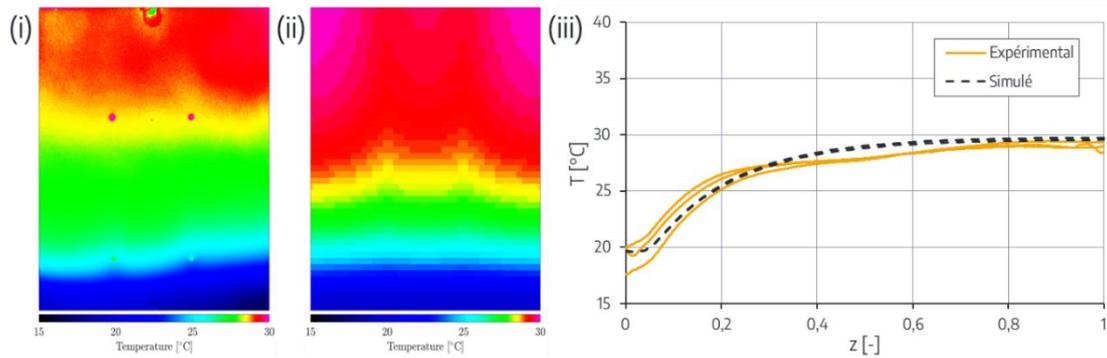


Figure 8 : Résultats de simulation numérique pour le cas 45 W - FR = 30% : (i) thermogramme expérimental, (ii) thermogramme simulé, et (iii) comparaison des profils de température

5. Conclusions

A partir d'une étude expérimentale menée sur un caloduc oscillant plat par l'intermédiaire de la thermographie infrarouge, des champs de température moyennés du fonctionnement du système en régime stabilisé pour deux taux de remplissage (30% et 50%) ont été analysés pour remonter, par méthode inverse, au profil de conductivité thermique du caloduc. Cette approche permet de mettre en évidence le lien étroit entre la résistance thermique du caloduc et la valeur maximale obtenue pour la conductivité thermique équivalente. L'analyse des profils de conductivité thermique a montré, notamment à basse puissance, des valeurs plus élevées pour un taux de remplissage à 30%, traduisant d'un optimum autour de cette valeur.

Les profils de conductivité thermique ont ensuite été utilisés pour simuler le comportement thermique du caloduc via un modèle numérique par différence finie 3D. Les résultats de simulation sont cohérents avec les visualisations expérimentales. Pour un cas de test à 45 W avec un taux de remplissage de 30%, l'erreur maximale ne dépasse pas 1,3°C.

Cette étude demande d'être approfondie avec davantage de données expérimentales pour des modes opératoires différents (nature du fluide, taux de remplissage, conditions limites etc.) afin de gagner en robustesse dans le but d'établir des lois empiriques pour une approche de modélisation orientée système.

Références

- [Hemadri-11] - A. G. S. K. Vadiraj A. Hemadri, «Thermal radiators with embedded pulsating heat pipes: Infra-red thermography and simulations» Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp1332-1346, 2011.
- [Kamijima-20] - Y. Y. A. S. I. K. Chihiro Kamijima, «Relating the thermal properties of a micro pulsating heat pipe to the internal flow characteristics via experiments, image recognition of flow patterns and heat transfer simulations» International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 163, 2020.
- [Kwon-15] - S. J. K. Gi Hwan Kwon, «Experimental investigation on the thermal performance of a micro pulsating heat pipe with a dual-diameter channel» International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 89, pp817-828, 2015.

Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE, établie entre le laboratoire Pprime de Poitiers et Stellantis (Site de Carrières-sous-Poissy), par le biais de l'OpenLab Fluidics.