

Identification des positions du front d'assèchement dans un caloduc cylindrique à rainures axiales

Zied LATAOUI^{1,2*}, Daniel PETIT¹, Abdelmajid JEMNI², Cyril ROMESTANT¹, Yves BERTIN¹

¹Laboratoire d'Etudes Thermiques- UMR CNRS 6608

ENSMA- 1, Avenue Clément ADER- BP 40109- 86961 Futuroscope-Chasseneuil cedex (France)

²Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques

ENIM, Avenue Ibn El Jazzar-5019 Monastir (Tunisie)

* (auteur correspondant : lataoui@let.ensma.fr)

Résumé – La compréhension des mécanismes de transferts diphasiques au sein des caloducs est étroitement liée à la détermination de la répartition interne du fluide caloporteur (phases liquide et vapeur), dans la structure capillaire. Nous montrons dans cette étude, comment appréhender cette difficulté, par la mise en place d'une méthode inverse : celle-ci permet, à partir de mesures de températures au sein de la paroi, d'identifier la position du front d'assèchement au sein de chaque rainure du caloduc. Les premiers résultats de tests montrent la fiabilité de la procédure qui fournit donc un outil performant pour l'analyse des phénomènes.

Nomenclature

h	coefficient d'échange global, $W.m^{-2}.K^{-1}$	<i>Symboles grecs</i>
J	fonction objet	σ écart-type, K
N_{mes}	nombre de points de mesure	<i>Indices et exposants</i>
T	température, K	* donnée expérimentale
X_i	front d'assèchement dans la rainure i , m	

1. Introduction

Les caloducs, transmetteurs de chaleur à haute performance, sont de plus en plus utilisés dans divers domaines (industrie électronique, aérospatial, ...) pour remédier à des problèmes thermiques (dissipation de chaleur, régulation thermique, ...). Les caloducs cylindriques axialement rainurés sont, à cet effet, un élément prépondérant dans la régulation thermique des satellites de télécommunication car ils permettent, d'une part, de récupérer la chaleur dissipée par les équipements électroniques et, d'autre part, de la répartir uniformément à la surface des panneaux radiatifs. Le fonctionnement du caloduc utilise les transferts de chaleur par changement de phase liquide-vapeur. Le caloduc est un élément passif qui permet de véhiculer de fortes densités de chaleur [1] entre une zone relativement chaude, lieu de l'évaporation, et une zone froide, lieu de condensation (Figure 1). Le retour du liquide vers l'évaporateur à travers la zone adiabatique s'effectue, dans ce cas, par capillarité due à la présence des rainures axiales en paroi interne du caloduc.

Les études expérimentales se limitent, dans la plupart des cas, à la mesure de températures à la paroi en fonction de la puissance transférée et de la température en zone adiabatique qui est uniforme. On détermine ainsi des conductances thermiques plus ou moins locales et le flux de chaleur maximal transférable correspondant à la limite de fonctionnement [2, 3, 4]. Dans la plupart des cas, ce flux maximal correspond à une limite capillaire se manifestant par un assèchement plus ou moins progressif des rainures dans la zone évaporateur.

L'objectif de cette étude est d'identifier les zones d'assèchement. La méthode repose sur la détermination d'un coefficient d'échange fluide paroi : la forte densité de flux transférée par

changement de phase est modélisée par un fort coefficient d'échange en phase liquide et un faible coefficient en phase vapeur. L'interface, au sein de chaque rainure axiale, est alors simplement repérée par la différence des valeurs des coefficients.

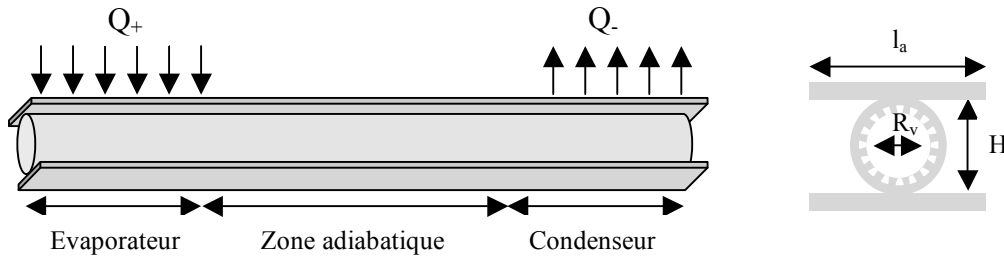


Figure 1 : Principe et composition des caloducs cylindriques à rainures axiales

Les caractéristiques du caloduc sont présentées dans le tableau 1. Il s'agit d'un caloduc cylindrique, de 22 mm de diamètre ($\phi 22$), à rainures axiales trapézoïdales. L'enceinte du $\phi 22$ est en alliage d'aluminium et le fluide caloporteur utilisé est l'ammoniac. Les températures de fonctionnement sont comprises entre -40°C et 90°C ce qui correspond à des pressions de saturation de 1 bar à 50 bar

Nombre de rainures	N	45
Hauteur du profilé	H	22 mm
Rayon vapeur	R_v	7,9 mm
Largeur de l'aile	l_a	39 mm
Epaisseur tube	e_t	1,5 mm
Longueur de l'évaporateur	$L_{\text{évap.}}$	200 mm
Longueur totale	L	2 m

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques du caloduc $\phi 22$

2. Etude expérimentale

Monté sur un rail optique afin de contrôler l'horizontalité, le caloduc $\phi 22$ est muni d'une résistance chauffante (bloc évaporateur en cuivre) et d'un échangeur à circulation de liquide (condenseur) permettant d'étudier le fonctionnement pour différentes conditions (inclinaison par rapport à l'horizontale, température de fonctionnement, puissance injectée au niveau de l'évaporateur). L'isolation du banc a été particulièrement soignée (isolation dynamique) afin de limiter les fuites thermiques. Plus de 120 thermocouples de type T ont été répartis en différentes positions de la paroi du caloduc dont 94 en zone évaporateur qui est la plus sensible thermiquement aux variations des paramètres de fonctionnement. Sachant que le caloduc est symétrique par rapport à un plan vertical, seule une moitié en section transversale est instrumentée. L'acquisition des mesures, en régime permanent, est gérée par un programme élaboré sous LABVIEW. L'ensemble de la chaîne de mesure est étalonnée afin d'obtenir un écart type des incertitudes de mesure entre thermocouples de l'ordre de $0,02^{\circ}\text{C}$ sans tenir compte des incertitudes de positionnement des sondes.

Le thermogramme de la figure 2 illustre un cas de fonctionnement limite (burnout) du caloduc pour une position horizontale ($\text{tilt}0\text{mm}$) et une température adiabatique de 10°C . Les valeurs très élevées des températures proches de la zone de chauffage montrent à l'évidence qu'il existe une grande zone asséchée dans laquelle il n'y a plus d'évaporation, ce qui conduit à un échange quasiment nul. Le flux est alors évacué par conduction suivant l'axe longitudinal, jusqu'à une zone où la présence de liquide permet un échange intense par évaporation.

La qualité des mesures a été renforcée en procédant à des corrections des mesures expérimentales obtenues à partir des incertitudes expérimentales de positionnement des thermocouples (évaluées à partir de photos hautes résolutions) et en considérant le gradient de température calculé par le modèle dans la zone d'implantation du thermocouple.

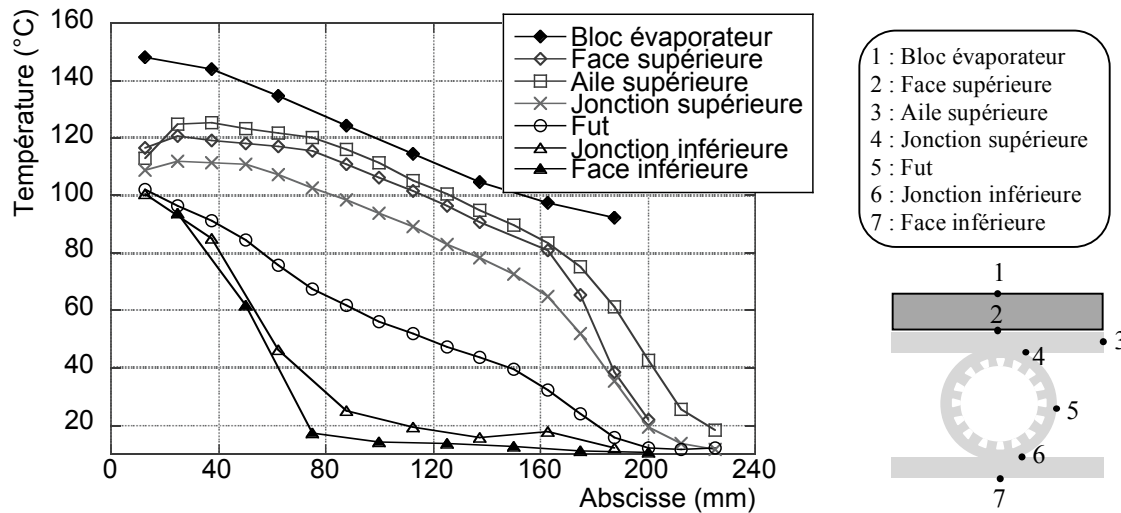


Figure 2 : Exemple de courbes de mesures expérimentales (10°C-burnout-tilt0mm)

L'analyse directe des thermographes est insuffisante pour localiser les zones d'assèchement dans chaque rainure axiale au niveau de la zone évaporateur, car il s'agit d'un problème conductif à trois dimensions avec des conditions aux limites à déterminer. L'utilisation d'une méthode inverse est alors une solution à envisager.

3. Utilisation des méthodes inverses

Dans cette partie, le principe de la méthode d'inversion appliquée au problème étudié est présenté. Afin de simuler les transferts de chaleur par conduction au niveau de l'évaporateur du phi22, un modèle direct par méthode nodale 3D, se basant sur l'analogie électrique, est élaboré sous l'analyseur de réseau ESACAP [5]. Ce type d'analyseur, donne accès aux sensibilités exactes des températures calculées par rapport aux variables du problème, ce qui représente un intérêt non négligeable en temps et en qualité de calcul numérique. En considérant la symétrie du caloduc, seules 23 des 45 rainures sont prises en compte dans la modélisation thermique.

Vu de la paroi, la présence de la phase liquide en rainure se traduit par un transfert de chaleur intense (par évaporation) donnant lieu à un coefficient d'échange global (base de la rainure/phase vapeur) h élevé (de l'ordre de 10^4 W/m²K). Par contre, l'échange thermique est faible en zone asséchée (h tend vers zéro), ce qui explique la surchauffe de la paroi à l'extrémité de l'évaporateur. Le front d'assèchement dans une rainure axiale, est défini par la position de séparation entre la partie totalement asséchée (à partir du bout du caloduc) et la partie mouillée en direction de la zone adiabatique.

Afin de simplifier le problème, le coefficient d'échange global h en présence de liquide est considéré comme uniforme dans toutes les rainures et la distribution des positions du front d'assèchement dans chaque rainure axiale est supposée strictement croissante de la partie inférieure jusqu'à la zone la plus proche de la source de chaleur. L'identification se ramène donc à déterminer les valeurs optimales des 23 positions axiales du front (X_i) et du coefficient d'échange global h en zone mouillée en minimisant un écart quadratique entre les températures expérimentales et les températures calculées. Le problème d'inversion se réduit,

par conséquent, à la minimisation d'une fonction objet $J(X_i, h)$, définie par la somme d'écart quadratiques entre les mesures et la modélisation :

$$J(X_i, h) = \sum_{N_{mes}} (T_i^* - T_i(X_i, h))^2 \quad (1)$$

La procédure d'optimisation utilisée, dans ce cas, est basée sur la méthode de programmation quadratique séquentielle, avec une approximation de type quasi-Newton pour les éléments de la matrice Hessienne [6, 7]. L'algorithme d'inversion est présenté dans la figure 3 :

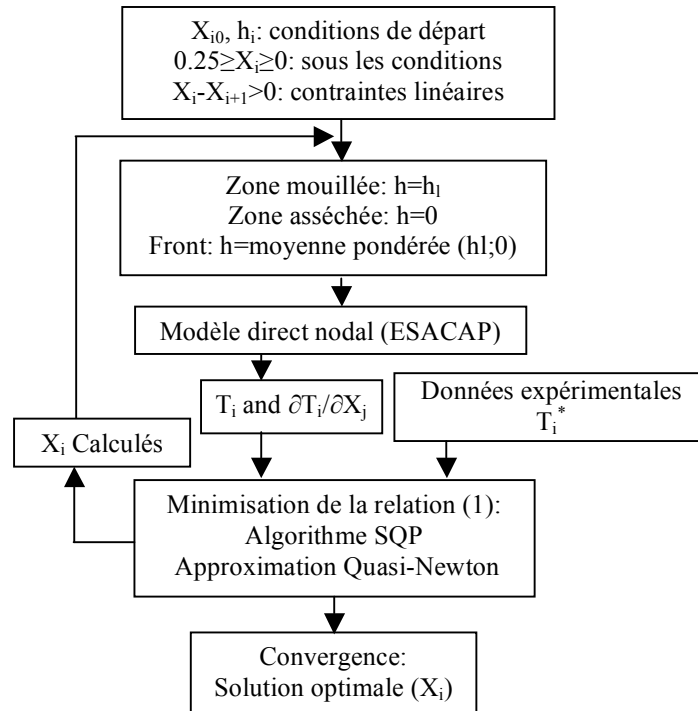


Figure 3 : Algorithme de résolution du problème inverse

Avant d'introduire les mesures expérimentales, la procédure d'inversion a été testée en utilisant des températures générées par le modèle direct à partir d'une distribution des positions du front d'assèchement connue et une valeur de h donnée ($h=10^4$ W/m²K).

Les figures 4 et 5 montrent que la distribution des positions du front d'assèchement prédéfinies peut être retrouvée pour différentes configurations de départ. La valeur de h imposée est aussi retrouvée dans différents cas avec une erreur maximale de 1%.

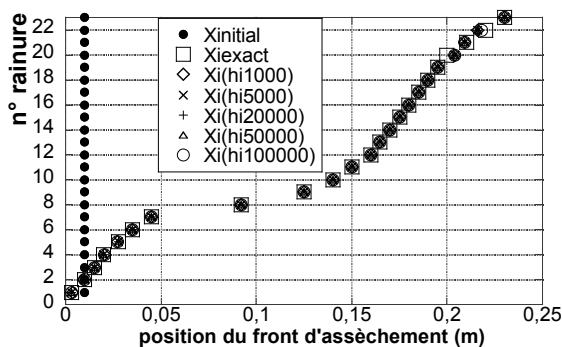


Figure 4 : tests d'inversion pour différentes valeurs de départ h_i

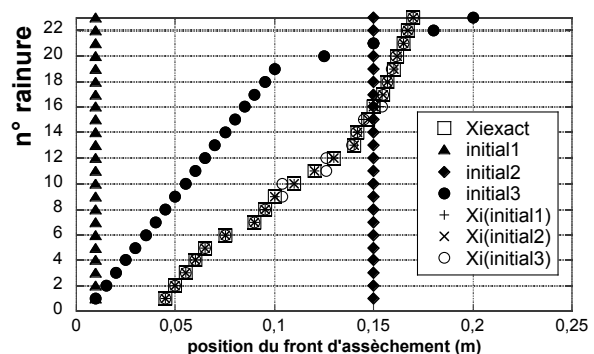


Figure 5 : tests d'inversion pour différentes configurations de départ de X_i ($h_i=5000$ W/m²K)

Même en introduisant un bruit de mesure de type Gaussien, les positions du front d'assèchement identifiées s'écartent peu des valeurs exactes jusqu'à un écart type du bruit de

1°C (figure 6). Au maximum, l'écart type de l'identification (σ) est égal à l'écart type du bruit imposé. σ est défini par :

$$\sigma = \sqrt{\frac{2J(X_i, h)}{N_{mes}}} \quad (2)$$

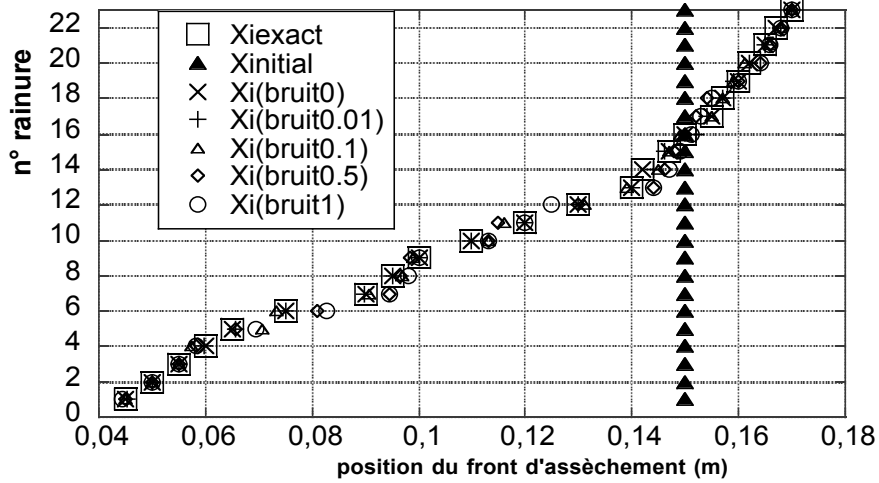


Figure 6 : Tests d'inversion avec bruit de mesure

4. Essai d'inversion avec les données expérimentales

En estimant les résultats des tests décrits dans la section précédente comme satisfaisants pour justifier l'efficacité et la fiabilité de la méthode d'inversion pour identifier les positions du front d'assèchement X_i et le coefficient h , un exemple de cas de fonctionnement est considéré (50°C-burnout-tilt0). La figure 7 illustre les positions du front, résultat de l'identification en utilisant les données expérimentales, pour trois différentes configurations de départ. En fonctionnement limite (burnout), quasiment toutes les rainures axiales sont totalement asséchées en zone évaporateur et en plus, les positions identifiées sont retrouvées quelle que soit la configuration de départ, justifiant ainsi la surchauffe de la paroi en extrémité du caloduc. La solution optimale obtenue est alors considérée comme stable et unique vis-à-vis des conditions de départ.

La valeur du coefficient d'échange h est estimée, pour cet exemple, à $2,3 \cdot 10^4$ W/m²K pour les trois configurations initiales.

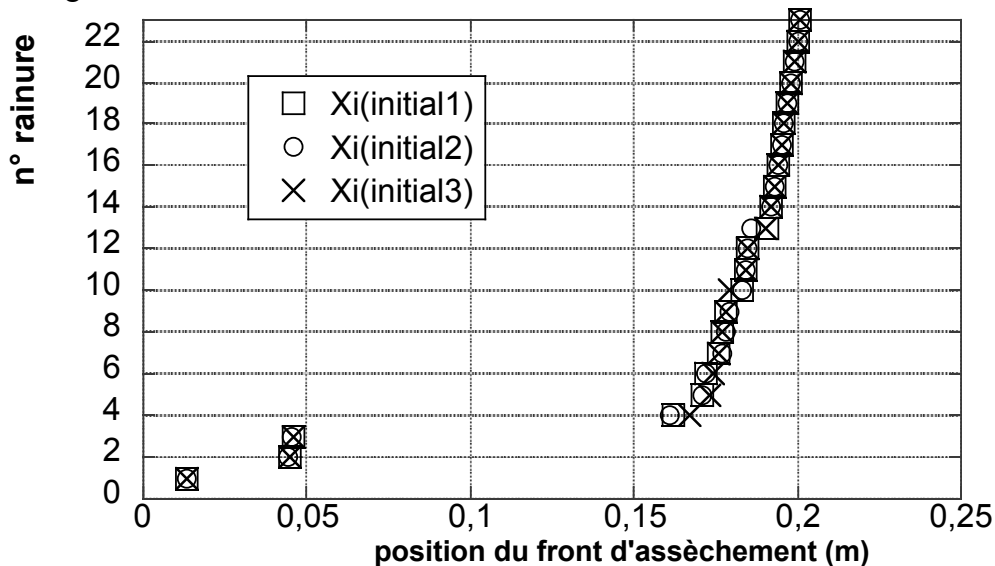


Figure 7 : Cas d'inversion avec des données expérimentales (50°C-burnout-tilt0)

5. Conclusion

Dans une première phase, la mesure de la température en paroi externe du caloduc phi22 nous a permis d'observer son comportement pour différentes configurations de fonctionnement. Cependant, cette caractérisation expérimentale s'est avérée insuffisante pour localiser avec précision les zones d'assèchement, paramètres clés permettant d'interpréter les profils de température expérimentaux.

Dans une deuxième approche, nous avons mis en place une méthode inverse qui, en associant les mesures (94 températures) à un modèle nodal, permet d'identifier un certain nombre de paramètres. Ces paramètres, au nombre de 24, sont les positions (X_i) du front d'assèchement dans chaque rainure ainsi que le coefficient d'échange global (h), défini entre la base de la rainure et la phase vapeur. Le programme d'inversion a tout d'abord été testé à partir de mesures simulées (non bruitées, puis bruitée), pour différentes initialisations du vecteur des inconnues.

Les résultats obtenus pour un jeu de mesures expérimentales (50°C-burnout-tilt0), montrent une bonne stabilité de la solution et par conséquent, prouve l'efficacité de cet outil numérique pour identifier des caractéristiques internes du fonctionnement du phi22. En effet, l'assèchement total de la zone évaporateur observé dans cette étude pourrait expliquer la surchauffe de la paroi en cette zone du caloduc phi22.

La procédure d'inversion pourrait être améliorée en considérant une approche à double front (la zone asséchée est localisée entre deux zones mouillées), cas susceptible de se manifester surtout pour les moyennes et les faibles puissances thermiques en évaporateur.

Références

- [1] A. Faghri, Heat Pipe Science and Technology, *Taylor&Francis*, 1995.
- [2] V. Barantsevitch, O. Golovin, K. Koncharov, A. Orlov, V. Buz, Investigation Performance of axial grooved heat pipes with high thermal capacity, *12th International Heat Pipe Conference*, Moscow, 2002.
- [3] G.P. Peterson, An Introduction to Heat Pipes: Modeling, Testing and Applications, *John Wiley & Sons*, New York, 1994.
- [4] S. Balram, A steady state model and maximum heat transport capacity of an electrohydrodynamically augmented micro-grooved heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp. 3957-3967, 2006.
- [5] P. Stangerup, manuel de l'utilisateur ESACAP, pp. 96-97, <http://www.ecs.dtu.dk/esacap.htm>, 2000.
- [6] J. E. Jr. Dennis, R. B. Schnabel, Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations, *Prentice-Hall*, 1983.
- [7] M. J. D. Powell, Variable metric methods in constrained optimization Mathematical Programming: The State of the Art (ed. A. Bachem, M. Greotschel and B. Korte), 288–311, *Springer-Verlag*, 1983.

Remerciements

L'ensemble de ces travaux a été rendu possible par le soutien de l'ambassade de France à Tunis (IFC) qui a financé les séjours de Zied Lataoui au LET.