

Visualisation et analyse expérimentale du comportement du fluide dans un caloduc rainuré

Ronan JACOLOT^{*1}, Cyril ROMESTANT¹, Vincent AYEL¹, Yves BERTIN¹, Julien HUGON²

¹Laboratoire d'Etudes Thermiques, UMR CNRS ENSMA 6608
1 avenue Clément Ader – B.P. 40109 – 86961 Futuroscope Cedex,

²Alcatel Alenia Space

* (auteur correspondant : ronan.jacolot@let.ensma.fr)

Résumé - La modélisation thermique et hydraulique des caloducs rainurés pour application spatiale nécessite une connaissance accrue du comportement des écoulements. Ceci concerne en particulier l'évolution des ménisques liée aux pertes de charge de l'écoulement liquide. A cet effet, un banc expérimental permettant la visualisation de l'interface liquide-vapeur au sein d'une rainure de caloduc a été développé. Celui-ci, associé à un traitement d'images, assure la caractérisation (rayon de courbure, hauteur de liquide,...) des systèmes étudiés en conditions réelles de fonctionnement. Le cheminement suivi et les premiers résultats expérimentaux effectués sur un demi caloduc rainuré pour application spatiale sont présentés dans cet article.

Nomenclature

Symboles latins

a profondeur de la rainure, m
 A section liquide, m^2
 b largeur de la rainure, m
 D_h diamètre hydraulique, m
 f coefficient de frottement visqueux
 g accélération de la pesanteur, $m.s^{-2}$
 h hauteur de liquide, m
 K perméabilité, m^2
 \dot{m} débit massique, $kg.s^{-1}$
 P pression, Pa
 P_m périmètre mouillé, m
 R rayon de courbure du ménisque, m
 Re nombre de Reynolds
 x abscisse, m

Symboles grecs

α inclinaison du caloduc, rad
 σ tension superficielle, $N.m^{-1}$
 ρ masse volumique de fluide, $kg.m^{-3}$
 μ viscosité cinématique, $Pa.s$

Indices et exposants

c capillaire
 g gravité
 l liquide
 v vapeur

1. Introduction

Le caloduc est un dispositif de transfert thermique à haute performance dont le principe repose sur le changement de phase d'un fluide. Son utilisation est devenue courante sur les satellites de télécommunication afin d'en assurer le contrôle thermique. Dans ce cadre, la majorité d'entre eux se compose d'une structure capillaire interne réalisée par des rainures axiales. Ces profils sont fabriqués par extrusion et leur simplicité de fabrication en fait des produits d'une grande reproductibilité et d'un coût par unité faible par rapport aux autres structures capillaires [1].

La pression capillaire ayant une valeur maximale liée à la géométrie de la structure capillaire, il existe une puissance de transfert maximale au-delà de laquelle le pompage capillaire n'est plus suffisant pour contrebalancer les pertes de charge, dues à une

augmentation du débit massique avec la puissance. L'évaporateur n'est plus suffisamment alimenté en liquide et s'assèche progressivement : il atteint alors son point de décrochage. Pour éviter de se retrouver dans ce cas de figure, il est nécessaire d'affiner la compréhension du comportement des écoulements dans les rainures et ainsi d'envisager des géométries de rainure plus adaptées afin d'améliorer le rapport *capacité de transport/masse du système* qui est un aspect fondamental dans le domaine du spatial. De plus, il semble que les modélisations thermo hydrauliques de pareils systèmes restent perfectibles pour les points de fonctionnement critiques [2].

Pour mieux caractériser les pertes de charges dues à l'écoulement liquide en rainure, un banc expérimental a été développé. La mesure du rayon de courbure et de la hauteur de liquide est effectuée pour déterminer l'évolution longitudinale de la pression dans les rainures grâce à un dispositif de visualisation associé à un traitement d'images. Nous présentons ce banc expérimental et illustrons les premiers résultats qu'il permet d'obtenir.

2. Ecoulement liquide dans une rainure

Du fait des écoulements induits lors du fonctionnement, les pressions dans le liquide et la vapeur varient le long du caloduc. La pression capillaire évolue donc axialement et ceci afin de compenser les pertes de charges [3] :

$$\Delta P_c(x) = P_v(x) - P_l(x) = \Delta P_l(x) + \Delta P_v(x) + \Delta P_g(x) \quad (1)$$

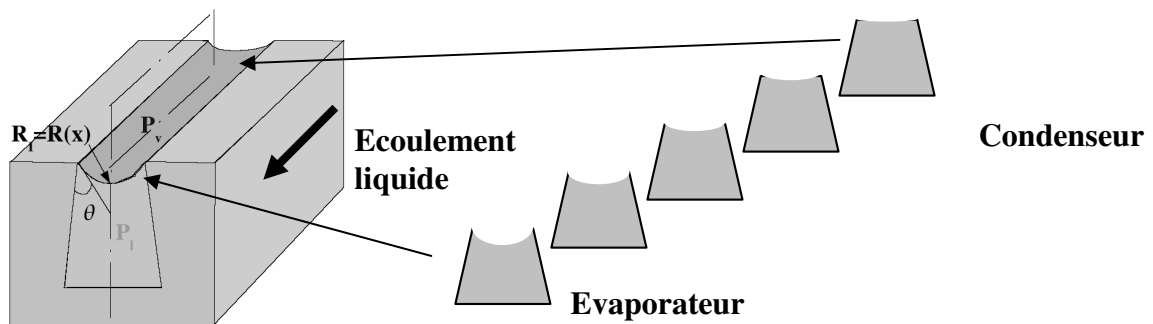


Figure 1 : évolution du ménisque entre condenseur et évaporateur

Dans le cadre de cette étude, on ne s'intéresse qu'à l'écoulement liquide, le terme $\Delta P_v(x)$ est sans objet, la pression extérieure est constante. Dans la suite, tous les termes sans indice se rapporteront au liquide. Pour une gamme de fonctionnement classique, l'écoulement liquide est laminaire. Il est d'usage de considérer ces rainures comme un milieu poreux et d'introduire la loi de Darcy pour évaluer le frottement visqueux [3]. Ainsi :

$$\frac{dP_l}{dx} = -\frac{\mu}{AK\rho} \dot{m} \quad (2)$$

où K représente la perméabilité. Elle est fonction du diamètre hydraulique $D_h = 4A/P_m$ et du nombre de Poiseuille fRe :

$$K = \frac{D_h^2}{2fRe} \quad (3)$$

Le coefficient fRe se déduit aisément des relations (2) et (3) :

$$fRe = -\frac{8\rho dP_l}{m\mu dx} \frac{A^3}{P_m^2} \quad (4)$$

Pour les rainures trapézoïdales et rectangulaires, le coefficient fRe est usuellement déterminé à partir des travaux de Shah et Bhatti, repris par Faghri [4]. Pour une rainure, la gestion de la surface est délicate quand on veut s'appuyer sur ces travaux. Faghri suggère de ne pas prendre en compte l'interface dans l'évaluation du diamètre hydraulique. En réalité, l'interface est soumise à des tensions superficielles qui induisent une contribution supplémentaire au frottement. Deux hypothèses de dépouillement permettent d'encadrer cette situation : un cas indicé 1 où l'interface est considérée comme une surface libre sans effet mécanique pour le calcul du périmètre mouillé (Faghri) et un cas indicé 2 où l'interface est considérée comme une paroi (Shah).

3. Dispositif expérimental

3.1. Profilés étudiés

Les profilés sont en aluminium réalisés par extrusion. Ils sont fournis par Alcatel Alenia Space, partenaire de cette étude. Nous présentons ici le travail mené sur 3 profilés différents :

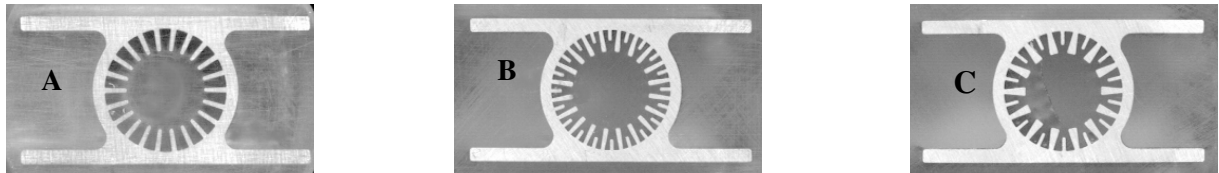


Figure 2 : coupe transversale des différents profilés : A: profilés à simples rainures trapézoïdales, B et C : profilés à doubles rainures trapézoïdales

3.2. Banc de mesures

Afin de pouvoir accéder aux informations désirées dans la rainure (rayon de courbure, hauteur de liquide, ...), un banc expérimental a été mis en place (voir figure 3) : un plan lumineux généré par une diode laser vient révéler l'interface à la surface liquide. L'image est ensuite enregistrée par un système incluant en particulier un microscope longue distance.

Un réservoir garantit un niveau de liquide constant en entrée de rainure L'ensemble caloduc et réservoir est monté sur un système de déplacement motorisé permettant d'effectuer des visualisations à différentes abscisses le long de l'écoulement.

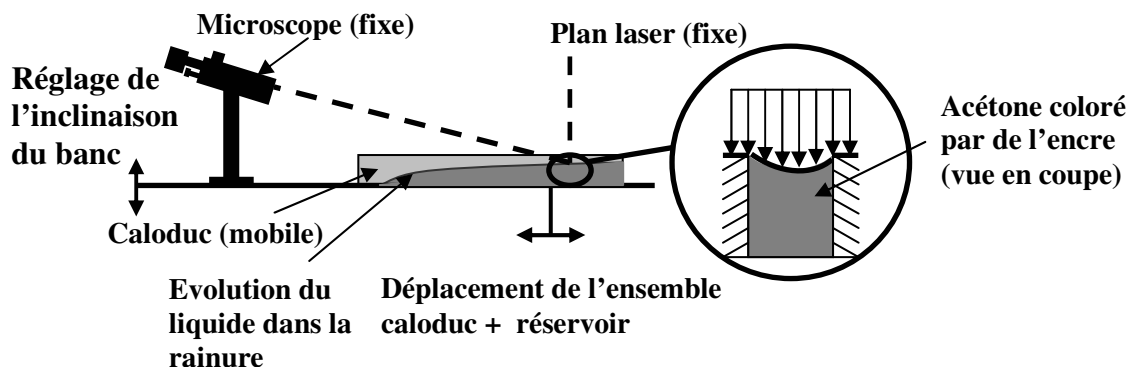


Figure 3 : principe de visualisation de l'interface liquide

Dans le cas du fluide en écoulement, la mise en mouvement de ce fluide est assurée par le montage présenté figure 4. Le principe est le suivant : un trou est effectué dans une des rainures puis un ensemble composé d'un tube capillaire, d'une pompe, d'une vanne by-pass et

de deux débitmètres permet la circulation du fluide ainsi que le réglage et la mesure du débit ainsi généré. Le montage permet de mesurer des débits variant de 0,011 à 0,81 l/h. Ces débits correspondent à des niveaux classiques pour des caloducs fonctionnant à l'acétone de puissances thermiques transportées pouvant atteindre 100 W.

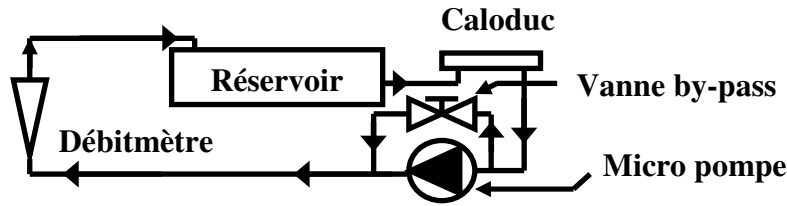


Figure 4: schéma de principe de la boucle de circulation

4. Résultats et discussion

Un travail préliminaire a été mené en l'absence d'écoulement. Il a permis de définir une méthodologie d'exploitation et d'affiner les réglages. Des tests [5] ont permis de valider cette démarche et d'obtenir une précision inférieure à 0,5 Pa sur la mesure de la pression capillaire.

4.1. Pertes de charges

Rappelons que l'objectif de cette étude est de déterminer la valeur des pertes de charges liquides générées par un écoulement forcé dans une des rainures. En présence d'un écoulement, le ménisque se courbe le long de l'écoulement de façon à compenser les pertes de charges liquides et la variation de pression liée à la gravité. On peut donc écrire entre deux points d'abscisses x_{ref} et x_{mesure} :

$$\Delta P_{c \ x_{ref}-x_{mesure}} - \Delta P_{g \ x_{ref}-x_{mesure}} = \sigma \left(\frac{1}{R_{x_{ref}}} - \frac{1}{R_{x_{mesure}}} \right) - \rho g (h_{x_{ref}} - h_{x_{mesure}}) = \Delta P_{l \ x_{ref}-x_{mesure}} \quad (7)$$

Les deux graphiques suivants présentent l'évolution des pertes de charges et du coefficient de frottement visqueux pour un profilé simple rainure. Rappelons que Faghri adopte la corrélation de Shah mais néglige l'interface dans l'évaluation du périmètre mouillé. Nous effectuons cette même hypothèse pour les valeurs expérimentales indicées 1. Les valeurs expérimentales indicées 2 considèrent au contraire l'interface dans cette évaluation et de ce fait se ramènent à une conduite fermée comme Shah

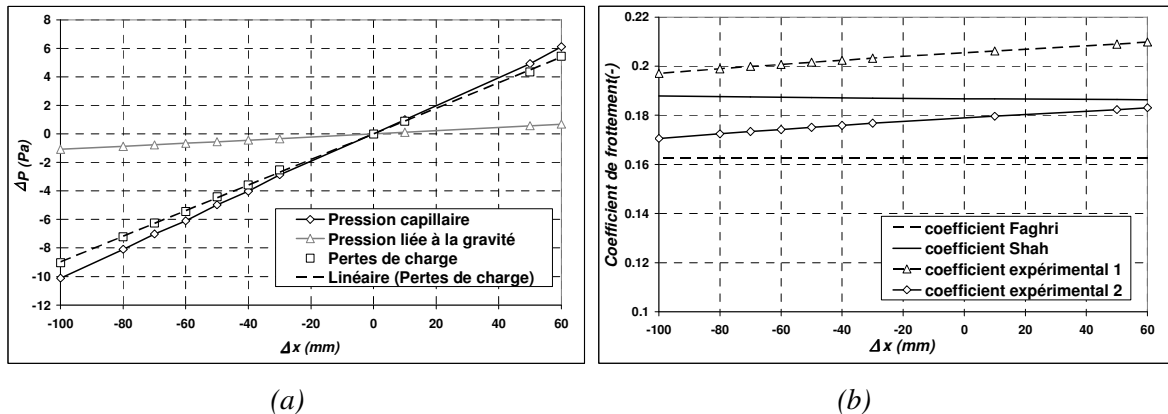


Figure 5 : (a) : évolution des pertes de charges liquides (à gauche) ; (b) : évolution du coefficient de frottement visqueux (à droite) (profilé A, débit 3,88 ml/min, inclinaison : 2 mm/m)

Les pertes de charges évoluent linéairement suivant x , mais les paramètres A et P_m varient ce qui entraîne une évolution axiale du nombre de Poiseuille fRe . Sa valeur est liée à la géométrie de la rainure d'une part mais aussi à la variation du rayon de courbure comme le montre le tableau suivant.

Profilé	A		B		C	
Rayon de courbure (mm)	2,42	0,67	2,86	0,67	2,60	0,75
fRe_1	20,17	18,35	22,55	20,41	22,27	20,09
fRe_2	15,41	13,67	18,62	16,55	18,44	16,28
fRe_{shah}	15,5		15,3		14,5	

Tableau 1 : évolution du nombre de Poiseuille en fonction du rayon de courbure pour les profilés A, B et C

Il faut toutefois noter que les valeurs issues des résultats analytiques correspondent à un calcul en conduite fermée et non à une rainure, où l'interface joue un rôle encore mal évalué. Par ailleurs, dans le cas des géométries double rainure, l'influence de la petite rainure n'est prise compte qu'au travers du calcul du périmètre mouillé et non d'un point de vue hydrodynamique.

Afin de mieux appréhender le rôle de cette interface, il est apparu plus judicieux de comparer les pertes de charge. Les deux tableaux qui suivent présentent les valeurs des pertes de charges obtenues expérimentalement et celles issues de l'exploitation des résultats de Shah et de Faghri.

Débit (ml/min)	6,06	3,88	2,62	Débit (ml/min)	3,37	2,22	1,61
ΔP_{l_exp} (Pa/m)	138,7	89,7	61,8	ΔP_{l_exp} (Pa/m)	189,3	122,5	89,1
ΔP_{l_Faghri} (Pa/m)	114	72,6	49,3	ΔP_{l_Faghri} (Pa/m)	140,1	92,3	64,1
ΔP_{l_Shah} (Pa/m)	151,6	96,3	65,5	ΔP_{l_Shah} (Pa/m)	172,1	113,4	78,9
	(a)			(b)			

Tableau 2 : comparaison des valeurs des pertes de charges liquides issues de l'expérimentation avec celles issues d'un calcul analytique: (a) : profilé A, (b) : profilé B

Pour le profilé A, dont la géométrie est simple, on observe des écarts importants entre valeurs analytiques et expérimentales si on considère l'interface comme une surface libre [3] (~20%), écarts qui se réduisent sensiblement en considérant l'interface comme une paroi (~10%). Pour des géométries plus complexes (profilé B), on observe que les valeurs analytiques sont très éloignées quelque soit le cas considéré (20 à 35%). Il apparaît donc que l'utilisation de méthodes analytiques appliquées à des géométries complexes est inappropriée et que même pour des géométries plus simples, les écarts restent significatifs.

4.2. Simulations numériques

Afin de mieux appréhender l'influence de l'interface, des calculs ont été menés avec un logiciel de CFD en considérant tour à tour l'interface associée soit à des conditions de paroi soit comme une surface libre sans tension superficielle. Pour ces calculs, le rayon de courbure a été choisi constant et égal à la valeur moyenne issue des résultats expérimentaux pour chaque cas considéré.

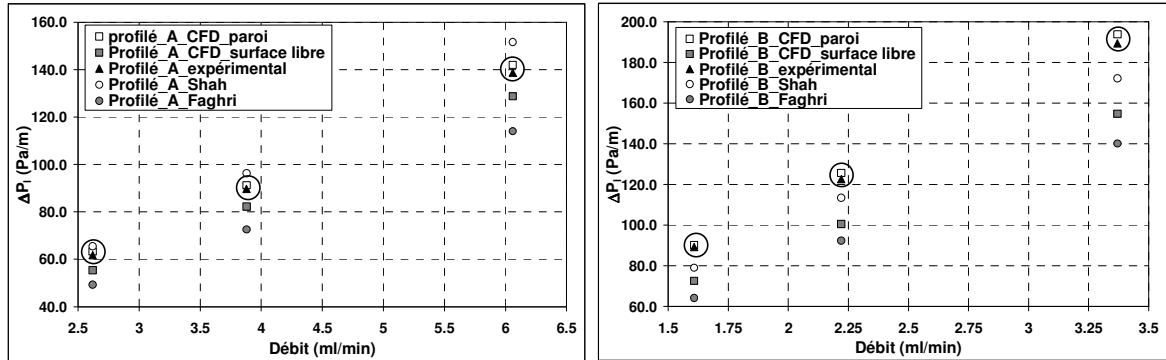


Figure 6 : Comparaison entre valeurs analytiques, numériques et expérimentales des pertes de charges pour les profilés A et B.

Tout d’abord, on peut noter que les valeurs expérimentales sont bien encadrées par les valeurs numériques obtenues en condition de paroi et en condition de surface libre. Ensuite, il apparaît que les valeurs expérimentales sont très proches des valeurs numériques obtenues en condition de paroi. L’interface semble se comporter sensiblement comme une paroi et génère par conséquent des frottements supplémentaires qui ne sont habituellement pas pris en compte puisque le périmètre de l’interface n’est pas usuellement inclus dans le calcul du diamètre hydraulique [3].

5. Conclusion

Après une première étape de validation [5], ce montage a permis de caractériser avec précision les pertes de charge liquide pour différentes géométries de profilés. Le principal résultat de ce travail concerne une meilleure appréhension du comportement de l’interface dans des rainures de faibles dimensions où la tension de surface semble avoir un impact important sur la consommation globale en pertes de charge. Par ailleurs, cela a aussi permis de mettre en avant les erreurs liées à l’utilisation des corrélations analytiques usuelles, erreurs pouvant aller jusqu’à 35% dans le cas de géométrie complexe. La suite des travaux va consister à réaliser des mesures en conditions réelles de fonctionnement anisotherme d’un caloduc fermé par une vitre de quartz. L’utilisation d’un colorant étant proscrite du fait du changement de phase existant, la solution envisagée pour visualiser l’interface est d’utiliser les propriétés de fluorescence de l’acétone en utilisant un laser UV pour générer le plan de visualisation.

Références

- [1] C. Hoa, B. Demolder, A. Alexandre, Roadmap for developing heat pipes for Alcatel Space’s satellites, *Applied Thermal Engineering* (2003), 1099-1108
- [2] C. Hoa, Thermique des caloducs à rainures axiales : études et réalisations pour des applications spatiales, *Thèse de l’université de Poitiers* (2004)
- [3] A. Faghri, Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis (1995)
- [4] R.K. Shah, M.S. Bhatti, Laminar convective heat transfer in ducts, *Handbook of Single Phase Convective Heat Transfer* (1987)
- [5] R. Jacolot, C. Romestant, Y. Bertin, V. Ayel, G. Burban, A Alexandre, C Fuentes, J. Hugon, Transferts thermiques en caloduc rainuré: visualisation et analyse expérimentale du comportement du fluide, *Congrès SFT* (île de Ré, 16-19 mai 2006)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Alcatel Alenia Space et la région Poitou Charente pour leur collaboration et leur soutien financier.