

Etude d'un caloduc oscillant plat testé avec un fluide remouillant sous champ de gravité variable

T. SOLÉ-AGOSTINELLI¹, V. AYEL¹, A. CECERE², F. JAULIN¹, C. ROMESTANT¹,
Y. BERTIN¹, R. SAVINO², M. MARENGO³

¹ Institut Pprime, CNRS – ENSMA - Université de Poitiers, UPR 3346, 1 av. Clément Ader, BP 40109, 86961 Futuroscope-Chasseneuil Cedex, France

² Università degli Studi di Napoli Federico II, Dip. Di Ing. Aerospaziale, P.le V. Tecchio 80, 80125 Napoli, Italy

³ University of Brighton, School of Computing, Engineering and Mathematics, Lewes Road, BN2 4GJ Brighton, UK

Résumé – Dans cette article, l'étude expérimentale d'un caloduc oscillant (PHP) plat avec un canal à section carrée testé sous hyper et microgravité est analysée. Les fluides testés sont l'eau pure et un mélange eau-butanol offrant les propriétés au fluide d'être « remouillant » (tension de surface augmentant avec la température). Les résultats montrent que, si les deux fluides ont tendance à s'assécher lors des phases de microgravité, le mélange est sujet à des mouvements de fluide rapides et intenses le long du PHP bien plus fréquents que pour l'eau pure, permettant des transferts de masse et de chaleur plus efficaces. La mouillabilité est un critère qui semble essentiel à ce comportement.

1. Introduction

Les caloducs oscillants (ou PHPs, « *pulsating heat pipes* ») sont constitués d'un unique tube, aux dimensions capillaires, enroulé sur lui-même entre sources chaude et froide par de multiples aller-retours. Ils sont partiellement remplis d'un fluide à l'état de saturation qui se répartit de manière aléatoire en phases liquide et vapeur séparées par les forces capillaires. L'application d'un flux au niveau de la source chaude va forcer les bulles de vapeur formées par évaporation à déplacer le fluide vers la source froide où elles vont se condenser et permettre au liquide chaud d'évacuer une part de la puissance sous forme sensible. Il est largement accepté que les mouvements du fluide sont initiés par des instabilités locales de pression entre branches [1-3]. C'est donc le régime hydraulique qui va piloter la nature et l'intensité des transferts thermiques globaux dans ces systèmes, et beaucoup de paramètres en ont une influence directe [4,5], notamment le diamètre interne du tube permettant la division des phases en bouchons liquides / bulles de vapeur séparés par des ménisques [5] ; d'autres influent particulièrement comme le nombre de boucles, les dimensions du PHP, le taux de remplissage ou les propriétés thermophysiques du fluide ; l'inclinaison du PHP tout comme l'absence des forces gravitaires (pour des applications spatiales) ont aussi une très grande influence sur son fonctionnement. C'est le cas pour cette étude au cours de laquelle des caloducs oscillants ont été testés en conditions de microgravité lors de campagnes de vols paraboliques, dans le cadre du projet InWIP (« *Innovative Wickless heat Pipe systems for ground and space application* ») piloté par l'ESA.

L'une des questions les plus importantes pour les PHPs fonctionnant sous microgravité est la nature du régime d'écoulement qui ne peut être évalué grâce au nombre de Bond (défini par $Bo = (g(\rho_l - \rho_v)L^2/\sigma)$) donnant lieu au diamètre critique en-deçà duquel les forces capillaires contrebalancent les forces gravitaires (ici, pour l'eau $D_{crit} = 2(\sigma/g(\rho_l - \rho_v))^{1/2} \approx 5,35$ mm à 40°C), et qui ne s'applique que sur Terre. Toutefois, il a été démontré que les PHPs peuvent fonctionner sous des conditions de microgravité [6-10], mais seulement pour des temps courts (22 s environ) propres aux vols paraboliques. Des études récentes ont souligné la différence de nature des régimes hydrauliques sous gravité normale et sous microgravité, pour un PHP

tubulaire [10] ou plat [9]. La première a consisté à tester un PHP de diamètre interne 3 mm (supérieur à $D_{crit} = 1.66$ mm pour le FC72 à 20°C), avec une portion transparente au-dessus du condenseur. Les visualisations ont montré que les bulles étaient parfaitement symétriques par rapport à l'axe du tube, engendrant un régime d'écoulement de type bulles-bouchons, ce qui est encourageant pour les PHPs opérant sous microgravité. La deuxième [9] a consisté à tester un PHP plat en cuivre, et a montré, pour le FC72 avec des canaux de dimensions 2,5x2,5 mm², que les phases se séparaient aussi en bulles de vapeur / bouchons liquides pendant les périodes de microgravité, avec une tendance immédiate à l'assèchement à l'évaporateur, accompagnée de mouvements fluctuants globaux de fluide, très intenses, provoqués par l'évaporation de bouchons liquides s'écoulant naturellement vers l'évaporateur. Ces instabilités sont très importantes car elles sont le processus déclencheur des transferts globaux de masse et de chaleur dans les PHPs.

Dans le cadre de cette étude, des expériences avec de l'eau et un mélange eau-butanol visent à comparer les performances d'un PHP plat testé en conditions de microgravité pour ces deux fluides. En effet, le mélange a une tension superficielle qui, bien que plus faible que celle de l'eau pure, augmente avec la température au-delà d'un certain seuil, ce qui lui donne la particularité d'être « *remouillant* » [11-12]. La figure 1 présente la tension superficielle fonction de la température pour des mélanges eau-butanol à différentes concentrations [11].

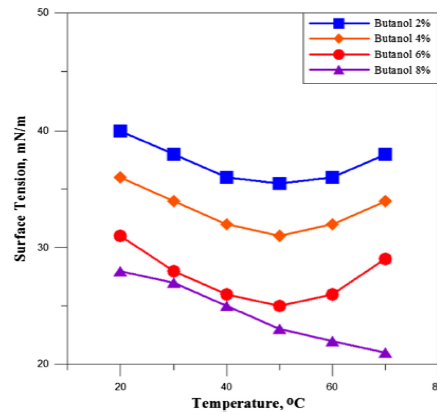


Figure 1 : Mesures de tensions superficielles de mélanges binaires [11]

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental consiste en un PHP plat à section rectangulaire ayant une face transparente pour les analyses vidéo des mouvements du fluide (figure 2 de gauche). Il est composé d'une plaque de cuivre de 140x210 mm² et 3 mm d'épaisseur, sur lequel un canal unique a été usiné ($N = 11$ boucles, section 3x3 mm²). Une vitre de borosilicate (134x204x5 mm³) est collée sur la face supérieure de la plaque avec de la colle silicone (NUSIL® CV7 2289 1P), qui offre des propriétés d'élasticité intéressantes pour pallier les dilatations différentielles du borosilicate et du cuivre, mais est très légèrement poreuse, entraînant une migration de molécules d'air (gaz incondensable) dans le PHP lorsque ce dernier est en dépression par rapport à l'air ambiant. La présence des gaz incondensables est extrêmement néfaste au bon fonctionnement des caloducs oscillants. Pour cela, un canal de garde, consistant en une boucle fermée sur elle-même reliée à un réservoir de vide externe, assure une pression inférieure à celle du PHP pendant la durée des expériences.

Le condenseur est refroidi par une circulation d'eau dans une plaque brasée directement sur la face arrière du PHP (100x140 mm²). Une pompe assure sa circulation jusqu'à une plaque en aluminium elle-même refroidie par l'air ambiant avec 15 blocs ventilateurs/ailettes (figure 2 de droite). Le système est asservi en boucle fermée. La source chaude est constituée d'un fil chauffant (diamètre 1mm) serti dans une plaque de cuivre de 120x10x2 mm³, aussi brasée sur

la face arrière du PHP. La puissance est délivrée par une alimentation électrique pilotée par un programme LabVIEW®. L'ensemble est dans une zone « confinée » (figure 2 de droite), dont le rôle est d'isoler les fluides de la cabine de l'avion, pour y éviter toute contamination. Des plaques transparentes sont donc utilisées à cet effet ; elles ferment l'enceinte contenant le PHP.

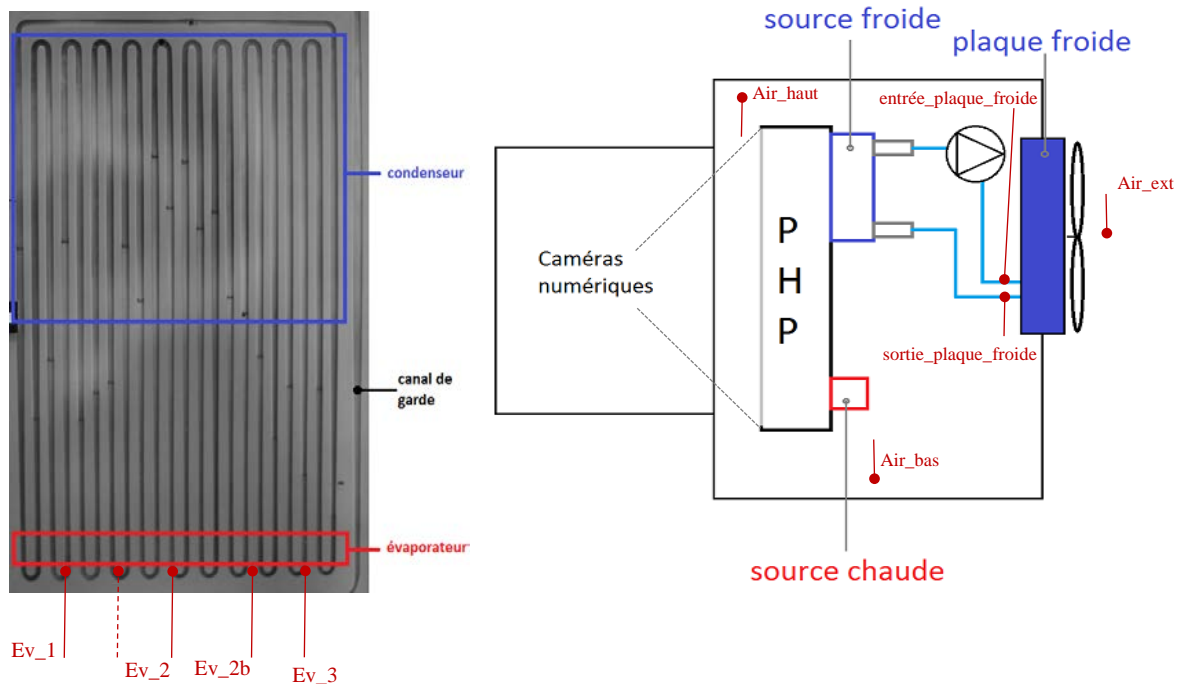


Figure 2 : Vue de face du PHP (gauche) et schéma global de l'installation (droite)

Le système est instrumenté par 10 thermocouples (type T, $\pm 0,5$ K, figure 2) permettant de mesurer : les températures aux niveaux de la source chaude (3 TC insérés dans des rainures entre la face arrière du PHP et la plaque chauffante, Ev_1 à 3), froide (2 TC en entrée et sortie de la plaque froide), de l'air ambiant (2 TC en zones haute et basse de la zone confinée), ainsi que de l'air externe, de la plaque froide et du capteur de pression. Deux capteurs mesurent les pressions à l'intérieur du PHP et dans le canal de garde (GE PTX5076-TA-A3-CA-HO-PS, 1,5 bars absolus, ± 200 Pa). Deux caméras numériques (Canon® EOS 100D et 550D, 50 Hz) assurent les visualisations du fluide, notamment sur la totalité du PHP. Enfin, un accéléromètre mesure l'intensité de l'accélération de la pesanteur pendant les tests.

Deux ordinateurs permettent, l'un, l'acquisition de toutes les données mesurées ainsi que le pilotage de la puissance des fils chauffant du PHP grâce au programme LabVIEW®, l'autre le réglage des caméras et l'enregistrement des données vidéos. La synchronisation des visualisations est effectuée au moyen d'une DEL déclenchée sur Labview® par l'utilisateur.

Pour finir, le PHP est testé en position verticale favorable par rapport au sol de l'avion. Le fluide de travail est l'eau ou un mélange eau-butanol à 4% en masse. La température de l'eau de refroidissement a été régulée de manière à approcher 30°C, tandis que l'air à l'intérieur de la zone confinée a été chauffé à 40°C environ à l'aide d'une résistance chauffante et d'un ventilateur, pour éviter la condensation du fluide contre la vitre, néfaste à la visualisation. Les puissances testées sont comprises entre 50 W et 200 W par palier de 50 W.

3. Résultats et discussion

Une campagne de vols paraboliques consiste en trois jours de vols ; chaque vol l'avion effectue 31 paraboles durant lesquelles des conditions de microgravité sont obtenues pendant 22 s. Les courbes qui suivent présentent les températures obtenues pour trois paraboles consécutives afin de bien observer les tendances selon les conditions de gravité. Ici, dans un

souci de place, seuls les résultats pour des puissances de 100 W et 200 W sont présentés. Les tests ont été effectués lors de la 65^{ème} campagne de vols paraboliques pilotée par l'ESA.

3.1 Résultats pour l'eau

Le premier jour de vol a été effectué avec de l'eau, choisie pour ces propriétés thermophysiques intéressantes dans ce qui a été constaté dans la littérature. Les figures 3 et 4 présentent les températures mesurées pendant 3 paraboles consécutives, pour une puissance de 100 W, et de 200 W, respectivement. On remarque que les températures à l'évaporateur (Ev_1 à 3, en rouge) augmentent immédiatement lorsque le système passe en condition de microgravité (visible par la courbe d'accélération, en gris). On observe une augmentation de près de 90% pour l'écart de températures entre l'évaporateur et l'eau de refroidissement pour 100 W, et de 140% pour 200 W par rapport aux conditions de gravité normale ; ceci sans atteindre un régime permanent, du fait du temps très court sous cette condition (22 s).

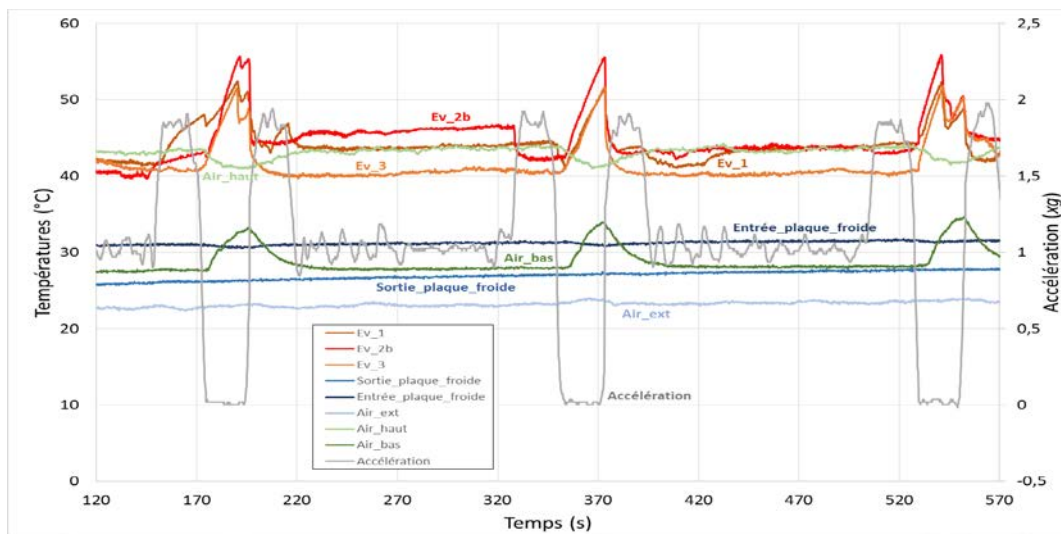


Figure 1 : Série de trois paraboles pour l'eau et un flux appliqué de 100 W

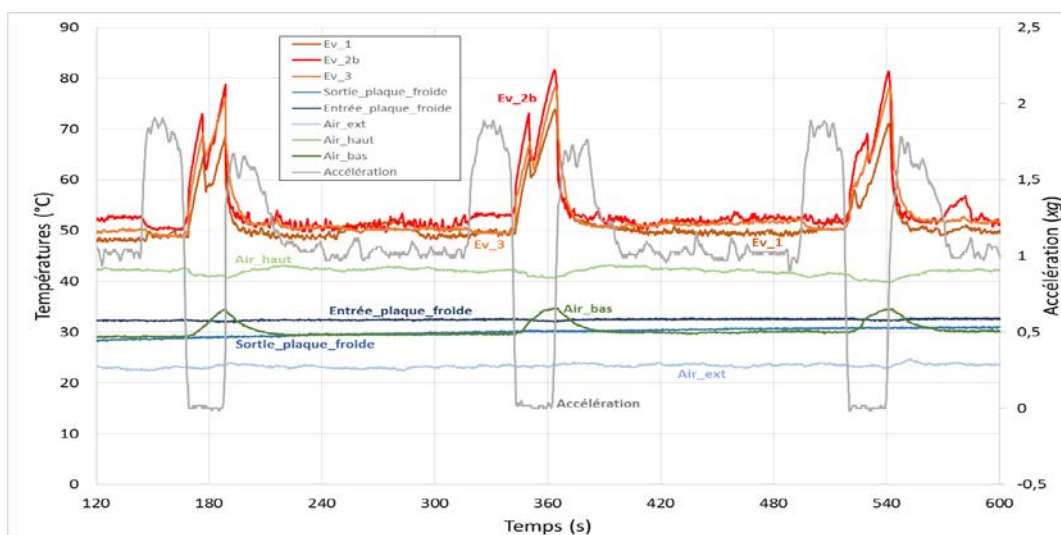


Figure 2 : Série de trois paraboles pour l'eau et un flux appliqué de 200 W

En conditions de gravité normale et augmentée, on remarque qu'il y a peu de fluctuations des températures, mais surtout de faible amplitude. Les comportements pour ces deux conditions sont similaires, les températures varient peu lorsqu'on passe de l'une à l'autre. On peut en revanche constater que les températures du PHP fluctuent considérablement lorsque

que le système passe en condition de microgravité, et de manière non équivalente selon les paraboles. Cela veut dire que le système est sujet à des périodes de refroidissement par le fluide, non régulières et non systématiques. Sur la figure 4 on voit que, pour 200 W, les températures augmentent logiquement beaucoup plus vite sous microgravité.

3.2 Résultats pour le mélange eau-butanol

Le mélange eau-butanol est un mélange à 4% de butanol ayant des caractéristiques physiques bien particulières [11], la principale différence étant la tension superficielle, plus faible que celle de l'eau, mais qui a la particularité de augmenter au-delà d'un certain seuil (ici, au-dessus de 50°C environ pour un mélange à 4% de butanol en masse, voir figure 1 [11]). Les expériences sont faites avec un PHP complètement identique à celui testé pour l'eau pour que seul le fluide soit le paramètre modifié entre les deux séries d'expériences.

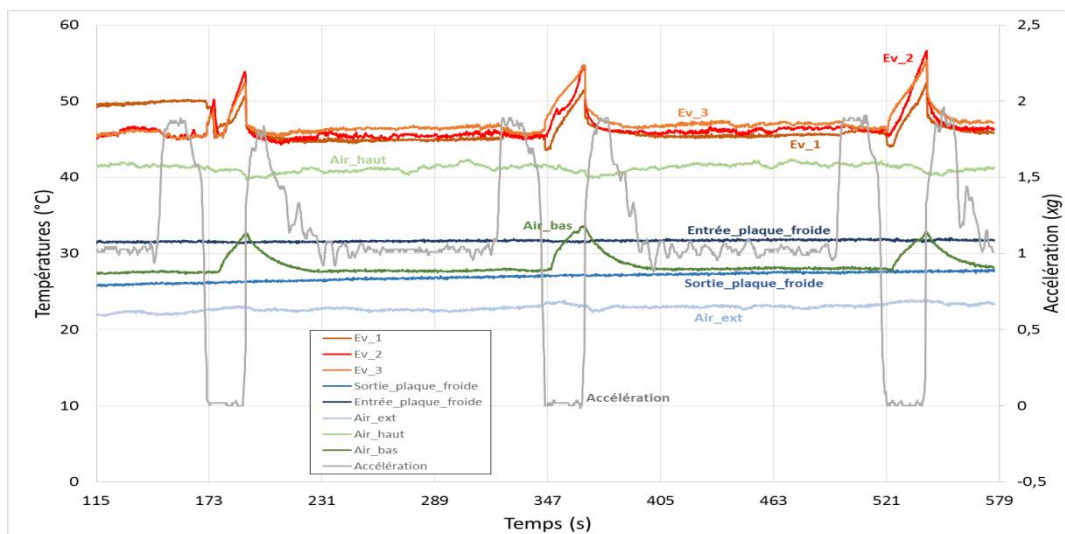


Figure 3 : Série de trois paraboles pour le mélange eau-butanol et un flux appliqué de 100 W

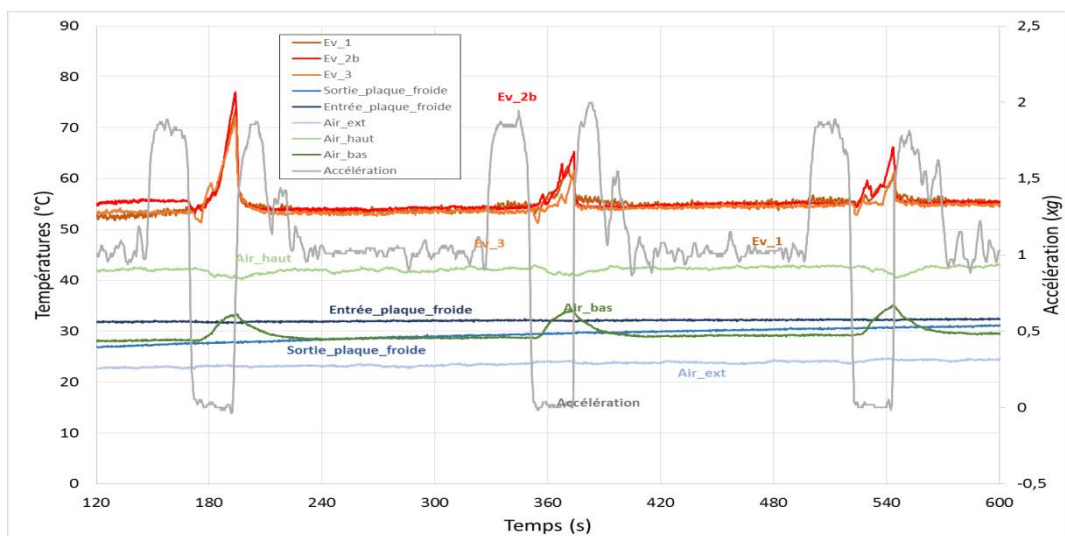


Figure 4 : Série de trois paraboles pour le mélange eau-butanol et un flux appliqué de 200 W

Les courbes des figures 5 et 6 présentent, de façon similaire aux figures 3 et 4 pour l'eau, les températures mesurées pendant 3 paraboles consécutives, pour une puissance de 100 W, et de 200 W, respectivement. Dans un premier temps on remarque que, sous gravité normale, le niveau moyen des températures à l'évaporateur du PHP (Ev_1 à 3) est supérieur à celui obtenu avec l'eau pure (par exemple, à 200 W, la température moyenne de l'évaporateur est d'environ

50°C pour l'eau pure –figure 4-, et de 55°C pour le mélange –figure 6-). Néanmoins, il est remarquable de constater que l'augmentation de température au niveau de l'évaporateur en microgravité est beaucoup plus réduite qu'avec l'eau pure, en particulier pour une puissance appliquée de 200W. Le PHP semble bien plus propice à un fonctionnement sous microgravité avec le mélange remouillant. Ceci semble traduire une augmentation des performances thermiques du PHP lorsque celui-ci est rempli d'un mélange eau-butanol, et lorsqu'il fonctionne avec un régime d'écoulement bulles/bouchons différent de celui observé sur Terre en configuration verticale, en raison de l'absence de régime de type thermosiphon. Cependant, les fluctuations de température observées sous microgravité restent supérieures à celles observées en condition de gravité normale ou augmentée, ce qui confirme le comportement observé pour l'eau dans les mêmes conditions.

Sur la figure 5, on peut constater que, dans un premier temps et en conditions de gravités normale et augmentée (à gauche de la courbe), la température d'un des trois thermocouples (Ev_1, à gauche de la zone évaporateur) reste plus élevée que les deux autres mais, lorsqu'arrive la phase de microgravité, on observe une chute de cette température et une homogénéisation des températures à l'évaporateur qui se maintient par la suite. On peut alors penser que la microgravité permet d'avoir, par un régime d'écoulement bulles/bouchons propice à un déplacement généralisé du fluide tout le long des canaux du PHP, une répartition de fluide qui tend à homogénéiser le champ de température. Une analyse de visualisations nous permettra de comprendre les comportements hydrauliques du fluide pour le PHP en fonctionnement, en fonction des conditions opératoires.

3.3 Analyse des courbes de températures par visualisations

Les vidéos ont montré qu'en condition de gravité normale ou augmentée, le régime était de type annulaire (réseau de thermosiphons interconnectés) pour l'eau, et semi-annulaire (avec présence de bouchons liquides) pour le mélange. En revanche, pour les deux fluides et toutes les expériences effectuées, il a été constaté un assèchement de l'évaporateur (associé à l'augmentation de sa température) dès lors que la transition se fait vers la microgravité. Les vidéos ont permis d'identifier les causes des fluctuations de températures, partant d'une situation d'évaporateur asséché, comme on peut le voir sur les images numérotées 1 des figures 7 (pour l'eau) et 8 (pour le mélange) ; ensuite, et pour la quasi-totalité des paraboles, un bouchon liquide se déplace progressivement vers l'évaporateur alors surchauffé (images 2 sur les figures 7 et 8) et va être y vaporisé. Cette vaporisation va déclencher un transfert de masse et de chaleur au sein de tout le PHP, associé aux baisses de températures constatées (figures 7 et 8 de droite) avant nouvel assèchement, et ainsi de suite.

Même si la répartition bulles/bouchons du fluide dans le PHP est aléatoire mais aussi influencée par la nature du fluide, on se rend compte que ce mouvement des bouchons liquides est présent pour les deux fluides (1 vers 2, figures 7 et 8). De plus, à chaque déplacement d'un bouchon vers l'évaporateur, les images qui suivent deviennent illisibles et inexploitable en raison d'un transfert massif et global de masse et de chaleur provoqué par la vaporisation du bouchon en question, trop rapide pour la fréquence d'acquisition des caméras (50 Hz). Ceci entraîne une nouvelle répartition liquide/vapeur du fluide dans le PHP, et une chute de température qui suit ce transfert. Sur les vidéos, on a pu constater que seule une branche, voire deux dans de très rares cas, voient leur répartition liquide/vapeur réellement changer entre deux assèchements.

Cependant, sous microgravité, les mouvements de bouchons liquides se font beaucoup plus rares pour l'eau que pour le mélange. Il semble pour l'eau que les bouchons liquides et quelques gouttes restent accrochés à la paroi (relativement à l'angle de mouillabilité fluide/paroi), et se meuvent ainsi difficilement vers l'évaporateur. Les différences de déplaçabilité des bouchons liquides entre les deux fluides peuvent provenir de trois raisons

principales : soit un phénomène de remouillage lié aux propriétés de tension superficielle évoquées dans l'introduction, et attirant les bouchons liquides vers l'évaporateur plus chaud ; soit le mélange présente une meilleure mouillabilité avec la paroi, ce qui facilite l'écoulement des bouchons liquides ; enfin, soit parce que des pressions de vapeur saturante plus importantes augmentent les instabilités liées aux différences de pression entre canaux.

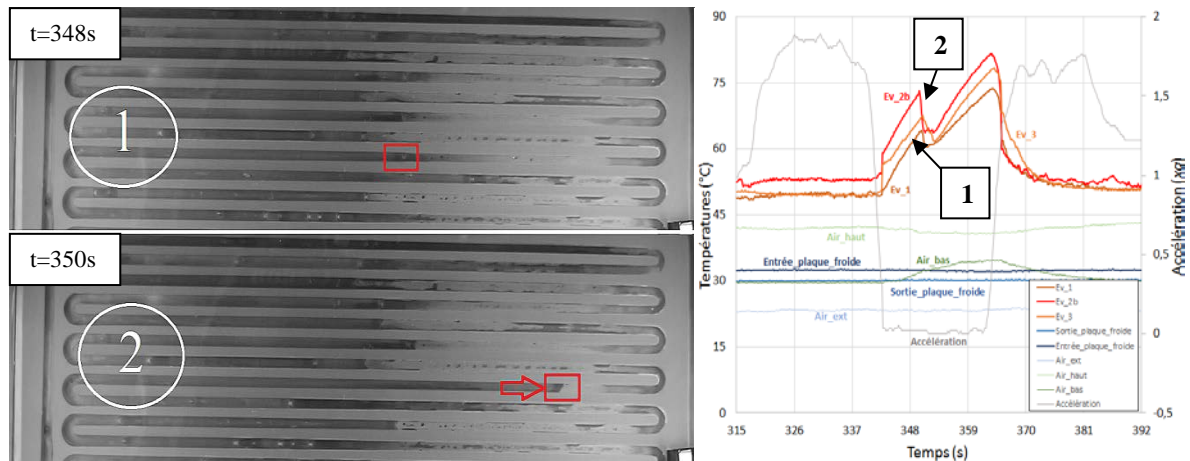


Figure 7 : Clichés du demi-PHP (gauche) et températures associées (droite) pour une parabole de la figure 4 (eau, 200 W)

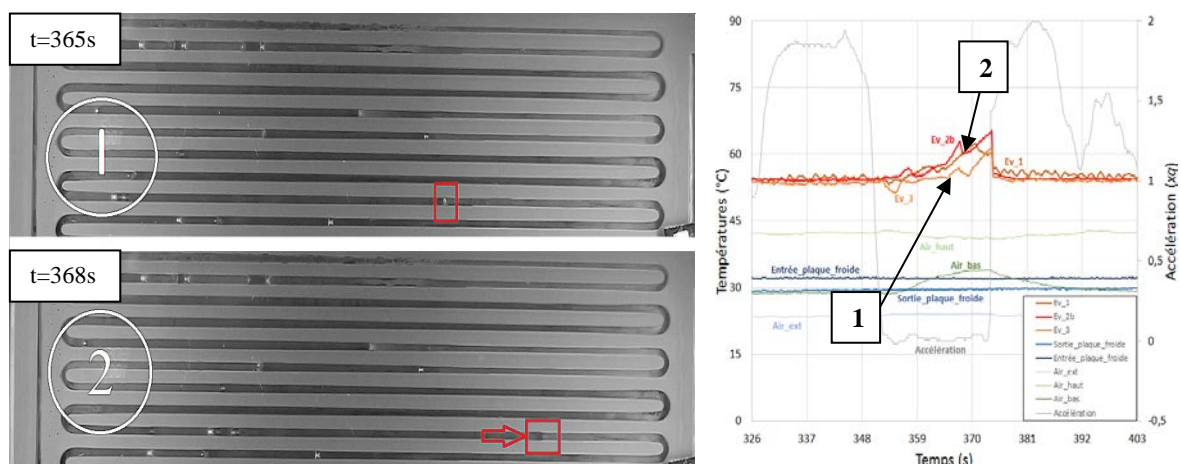


Figure 8 : Clichés du demi-PHP (gauche) et températures associées (droite) pour une parabole de la figure 6 (eau-butanol, 200 W)

Afin de se rendre compte de l'influence des phénomènes de capillarité et mouillabilité sur les mouvements de fluide dans le PHP, une comparaison entre les principales propriétés thermophysiques des deux fluides relativement aux mouvement des bouchons liquides est présentée dans le tableau 1, à titre d'exemple, pour une température de 50°C. Les propriétés du mélange ont été estimées à partir des formulations classiques (moyenne massique pour la masse volumique, méthode d'Orric-Erbar pour la viscosité liquide, méthode de Teja-Rice pour la conductivité thermique et loi de Raoult pour la pression de saturation).

Fluide	ρ_l (kg.m ⁻³)	μ_l (Kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)	σ (N.m ⁻¹)	λ_l (W.m ⁻¹ K ⁻¹)	P_{sat} (mBar)
Eau	988	5.10 ⁻⁴	0,068	6.04	12
Eau/butanol (4%)	979	5.5.10 ⁻⁴	0,032	5.64	13

Tableau 1 : Comparaison de quelques propriétés thermophysiques des deux fluides à 50°C

La majorité des propriétés indiquées ci-dessus ont des valeurs très proches (moins de 10% pour ρ_l , μ_l , λ_l et P_{sat}), qui ne justifient pas une divergence de comportement entre les

fluides. La principale différence tient dans la valeur de la tension de surface (plus de 50%), mais aussi certainement dans son augmentation avec la température au-delà de 50°C pour le mélange. Les auteurs sont donc convaincus que l'origine de ces comportements différents provient des phénomènes de capillarité, associés aux angles de contact statique et dynamiques du couple fluide/paroi. C'est ce qu'il va s'avérer nécessaire d'étudier par une approche locale afin de mieux comprendre et maîtriser les transferts au sein des caloducs oscillants.

4. Conclusion

Dans cette étude, l'analyse expérimentale des températures au sein d'un caloduc oscillant plat testé en conditions de microgravité et gravité normale, ainsi qu'une analyse qualitative grâce à des visualisations sont présentées. Deux fluides sont étudiés, l'eau et un mélange eau-butanol qui a des caractéristiques physiques intéressantes, notamment une propriété de remouillabilité.

Cette étude nous a montré que, sous condition de microgravité, pour un régime bulles/bouchons, le mélange est plus intéressant à utiliser que l'eau pure alors que, sous gravité normale, l'eau présente de meilleures performances. Néanmoins, on a remarqué que les deux fluides se comportent de la même manière sous microgravité et qu'un phénomène de déplacement de bouchons liquides peut entraîner une chute brutale des températures ainsi qu'un réagencement du fluide dans le PHP ce qui permet de retrouver un fonctionnement similaire à celui sous condition terrestre pendant un court instant.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Agence Spatiale Européenne pour leur soutien dans le cadre du projet INWIP, en particulier B. Toth, N. Melville et O. Minster, les membres de Novespace, notamment B. Vertier, F. Gai et A-C. Duschesne, et A. Piteau, Y. Thomas et J-C. Fraudeau de l'institut P' pour la qualité de leur travail technique.

Références

- [1] Tong, B., Wong, T., Ooi, K., Closed-loop pulsating heat pipe, *Appl. Thermal Eng.*, 21 (2001) 1845-1862.
- [2] Khandekar, S., Charoensawan, P., Groll, M., Terdtoon, P., Closed loop pulsating heat pipes, part B: visualization and semi-empirical modeling, *Appl. Thermal Eng.*, 23 (2003) 2021-2033.
- [3] Liu, S., Li, J., Dong, X., Chen, H., Experimental study of flow patterns and improved configurations for pulsating heat pipes, *J. of Thermal Sciences*, 16 (2007) 56-62.
- [4] Khandekar, S., Dollinger, N., Groll, M., Understanding operational regimes of closed pulsating heat pipes: an experimental study, *Applied Thermal Engineering*, 23 (2003) 707-719.
- [5] Charoensawan, P., Khandekar, S., Groll, M., Terdtoon, P., Closed loop pulsating heat pipes, part A: parametric experimental investigations, *Applied Thermal Engineering*, 23 (2003) 2009-2020.
- [6] Gu, J., Kawaji, M., Futamata, R., Microgravity performances of icro pulsating heat pipe, *Microgravity Science and Technology*, 16 (2005) 181-185.
- [7] Mameli, M., Araneo, L., Filippeschi, S., Marelli, L., Testa, R., Marengo, M., Thermal response of a closed loop pulsating heat pipe under a varying gravity force, *International Journal of Thermal Sciences*, 80 (2014) 11-22.
- [8] Iwata, N., Ogawa, H., Miyazaki, Y., Visualization of Oscillating Heat Pipe under microgravity, *Proc. of 17th International Heat Pipe Conference*, Kanpur, India (2013) 6 p.
- [9] Ayel, V., Araneo, L., Scalambra, A., Mameli, M., Romestant, C., Piteau, A., Marengo, M., Filippeschi, S., Bertin, Y., Experimental study of a closed loop flat plate pulsating heat pipe under a varying gravity force, *International Journal of Thermal Sciences*, 96 (2015) 23-34.
- [10] Mangini, D., Mameli, M., Georgoulas, A., Araneo, L., Filippeschi, S., Marengo, M., A pulsating heat pipe for space applications: Ground and microgravity experiments, *Int. J. of Thermal Sciences*, 95 (2015) 53-63.
- [11] S-C. Wu, Study of self-rewetting fluid applied to loop heat pipe, *Int. J. of Thermal Sciences* 98 (2015) 374-380.
- [12] Savino R., A. Cecere, R. Di Paola, Surface tension-driven flow in wickless heat pipes with self-rewetting fluids, *Int. J. Heat and Fluid Flow* 30 (2009) 380-388.