

Déformation d'origine électrique d'une interface liquide-vapeur dans une structure capillaire rainurée. Diagnostic par microscopie confocale.

Nicolas Cardin^{a,b}, Laurent Davoust^{a,*}, Stéphane Lips^b, Samuel Siedel^a,
Jocelyn Bonjour^b

a. Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP[†], SIMaP, F-38000, Grenoble, France

b. Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

Résumé :

La présente communication porte sur l'étude de l'effet d'un champ électrique alternatif sur une interface liquide-vapeur au sein d'une structure capillaire rainurée. En présence d'un champ électrique, une contrainte électrique s'applique sur l'interface liquide-vapeur dont l'origine est essentiellement liée au saut des propriétés électriques entre phases ; on parle volontiers d'électrohydrodynamique interfaciale de Taylor-Melcher. La composante normale de la contrainte électrique interfaciale en s'ajoutant à la contrainte capillaire et à la gravité vient modifier le saut de pression à l'interface entraînant par conséquent sa déformation. La déformée interfaciale est étudiée expérimentalement par microscopie confocale chromatique. Un banc expérimental est développé autour d'une structure capillaire reliée à la masse, et recouverte par une électrode plane supérieure et transparente reliée à la haute tension. La cavité étanche, ainsi réalisée, est partiellement remplie d'un fluide frigorigène, le HFE 7100, utilisé ici pour ses propriétés diélectriques, en conditions isothermes. En présence d'un champ alternatif, des phénomènes de résonance sont observés selon la fréquence d'actuation électrique. Une analyse spectrale de la déformée interfaciale est réalisée par vobulation fréquentielle.

Mots clefs : électro-hydrodynamique ; microscopie confocale ; vobulation

1. Introduction

Le besoin croissant en systèmes de refroidissement performants et robustes requiert l'amélioration des systèmes existants, en particulier ceux utilisant le changement de phase liquide-vapeur tels que les caloducs plats. Un caloduc plat est un système passif de transport de la chaleur composé d'une cavité étanche formée par deux plaques et rempli d'un fluide à l'état diphasique. Un tel système permet d'importants flux de chaleur par changement de phase et ce, même en présence d'un faible gradient thermique. La chaleur est extraite de la source chaude par évaporation du liquide, la vapeur produite s'écoule dans la cavité jusqu'à atteindre le condenseur, où la chaleur est finalement cédée à la source

* Auteur correspondant

† Institute of Engineering, Univ. Grenoble Alpes

froide par condensation de la vapeur. Le retour du liquide vers l'évaporateur est, dans le cas du caloduc plat, assuré par une structure capillaire par exemple constituée de micro-rainures. Les caloducs plats présentent plusieurs limites de fonctionnement, limitant le flux maximal que le système peut transporter. Pour augmenter le flux maximal transportable, l'utilisation de l'électrohydrodynamique (EHD) peut être envisagée. L'EHD réfère à l'utilisation d'un champ électrique en présence d'un fluide. Les effets du champ électrique sur le fluide dépendent des propriétés électriques du fluide mais aussi du régime électrique (AC ou DC). L'EHD interfaciale, décrite par Taylor-Melcher [1], est ici considérée. Dans ce cas, les charges électriques volumiques sont négligées dans les fluides en présence, à l'exception de celles accumulées à l'interface liquide-vapeur. Quand celle-ci est soumise à un champ électrique, un vecteur contrainte électrique émerge à l'interface *via* la loi de Gauss. La contrainte électrique normale ainsi créée dépend du saut de propriétés électriques des fluides à l'interface (conductivité, permittivité) et du saut de la composante normale de la champ électrique. Cette contrainte électrique normale vient s'ajouter à la contrainte capillaire et au saut de pression à l'interface, rendant ainsi possible la déformation contrôlée de cette dernière.

L'utilisation de l'EHD dans le but d'améliorer des écoulements ainsi que des systèmes thermiques diphasiques a déjà été proposée et appliquée avec succès aussi bien avec des champs électriques en régime DC [2–6] que AC [7]. Ainsi, plusieurs recherches ont été menées sur l'utilisation de l'EHD au sein d'un système thermique, afin de repousser les limites de fonctionnement ou de modifier les performances thermiques en régimes AC ou DC [8–10]. Différents modèles ont été proposés pour comprendre l'effet du champ électrique sur les performances d'un caloduc [11–13]. Cependant, ces modèles se concentrent sur les écoulements induits par la contrainte électrique interfaciale tangentielle mais ne prennent pas en compte l'effet d'un champ AC sur la déformation de l'interface liquide-vapeur. Or l'un ne va pas sans l'autre. Il subsiste donc un besoin d'améliorer la compréhension des mécanismes qui gouvernent l'effet de l'EHD quand un champ électrique AC est utilisé au sein d'un caloduc rainuré.

Dans la présente étude, l'effet du champ électrique sur la déformation d'une interface liquide-vapeur, confinée dans une rainure de section carrée et dont la ligne triple est accrochée sur les rebords de la rainure, est considéré. Un banc expérimental a été développé à cette fin et une méthode de vobulation fréquentielle est utilisée pour identifier certaines fréquences de résonance.

2. Configuration expérimentale

Une cavité étanche est formée par deux plaques opposées. Ces plaques étant utilisées comme électrode, un condensateur plan est ainsi formé, capable de soutenir un champ électrique intense. La plaque supérieure est connectée à la haute tension, tandis que la plaque inférieure est connectée à la masse. Celle-ci héberge sur sa paroi interne une fine structure capillaire consistant en une série de cinq rainures carrées (400 x 400 μm) remplies par un liquide diélectrique, le HFE-7100. Cette géométrie, représentée sur la Figure 1, est représentative d'un caloduc plat rainuré. Dans cette configuration, la longueur des rainures peut être considérée infinie, et ainsi, la configuration peut être considérée 2-D. La Figure 1 représente une vue schématique du dessus de l'expérience avec la plaque inférieure en aluminium rainurée. Cette dernière est séparée de la plaque supérieure transparente en verre par un joint en PTFE. La plaque en verre utilisée comme électrode à la haute tension est fonctionnalisée par un dépôt d'ITO sur sa face interne. Le dépôt d'ITO électroconducteur est également transparent permettant ainsi l'utilisation d'un système optique pour évaluer la déformation de l'interface liquide-vapeur quand le champ électrique est appliqué. Le dépôt d'ITO est relié à la haute tension par un film mince en cuivre inséré entre la plaque supérieure et le joint en PTFE. Un entrefer de 1,5 mm est assuré entre les deux

électrodes. Ce volume est essentiellement rempli de vapeur alors que la phase liquide est essentiellement confinée dans les rainures.

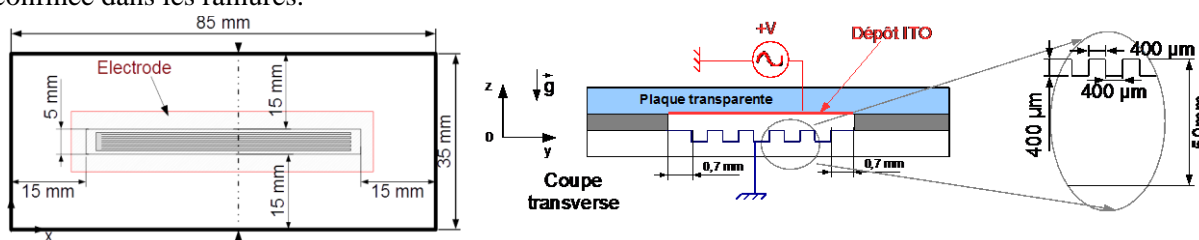


Figure 1. Vue de dessus de la section d'essai et coupe transversale.

Quand une différence de potentiel électrique est appliquée entre les électrodes dans la configuration étudiée, les phases liquide et vapeur agissent comme des condensateurs en série, de par leurs propriétés essentiellement diélectriques et faiblement conductrices. Une discontinuité du champ électrique à l'interface apparaît de par la loi de Gauss et le saut de propriétés électriques entre phases vapeur et liquide. En conséquence, deux contraintes électriques tangentielle et normale émergent à l'interface qui sont évaluées en résolvant le saut du tenseur de Maxwell entre les deux milieux [14,15]. La contrainte normale électrique engendrée à l'interface s'écrit :

$$\tau_n = \frac{\varepsilon_l}{2} (E_{l,n}^2 - E_{l,t}^2) - \frac{\varepsilon_v}{2} (E_{v,n}^2 - E_{v,t}^2), \quad (1)$$

avec ε_i la permittivité du milieu liquide ($i=l$) ou vapeur ($i=v$) et E la valeur du champ électrique. Les indices n et t indiquent les composantes normale et tangentielle du champ électrique. La contrainte normale électrique ainsi créée vient s'ajouter à la contrainte capillaire, à la pression et à la gravité, modifiant ainsi la déformée interfaciale. Il est important de noter que cette contrainte d'origine diélectrique est proportionnelle au carré du champ électrique, donc au carré de la tension appliquée.

3. Etude de la réponse fréquentielle de l'interface

3.1. Effet de la fréquence d'actuation sur la vibration de l'interface

Afin de détecter les fréquences naturelles de ce microsystème diphasique, un multiplicateur de tension est piloté par une interface Labview capable d'engendrer un signal électrique dont la fréquence est pilotable par incrément : le signal électrique est dit vobulé. Après amplification, l'actuation électrique imposée aux électrodes est composée d'une sinusoïde centrée sur 0, d'amplitude crête à crête mesurée à 900 V (Figure 2a). La fréquence électrique, f_e , débute sa course à 0.3 Hz et la termine à 150 Hz, ceci avec un incrément de 0.1 Hz toutes les cinq périodes (variation temporelle de la fréquence du signal électrique représentée par la courbe orange sur la Figure 2a). L'élévation du centre du ménisque le long de l'axe z est considérée comme fidèle de la réponse mécanique à l'actuation électrique. Elle est mesurée à la fréquence maximale d'acquisition du microscope confocal ici utilisé, i.e. 1000 Hz, et représentée sur la Figure 2b.

L'amplitude des oscillations mécaniques observée par le microscope confocal, f_m , ainsi que l'enveloppe du signal évoluent en fonction de la fréquence d'actuation électrique : différents extremums sur l'amplitude du signal sont mis en évidence, ainsi qu'une rupture de symétrie de l'enveloppe en régime basse fréquence. Cette rupture de symétrie sur la réponse mécanique n'est plus observable approximativement à 20 Hz et au-delà. Une double fréquence est aussi observée pour de très faibles valeurs de la fréquence d'actuation (voir zoom sur la Figure 2b).

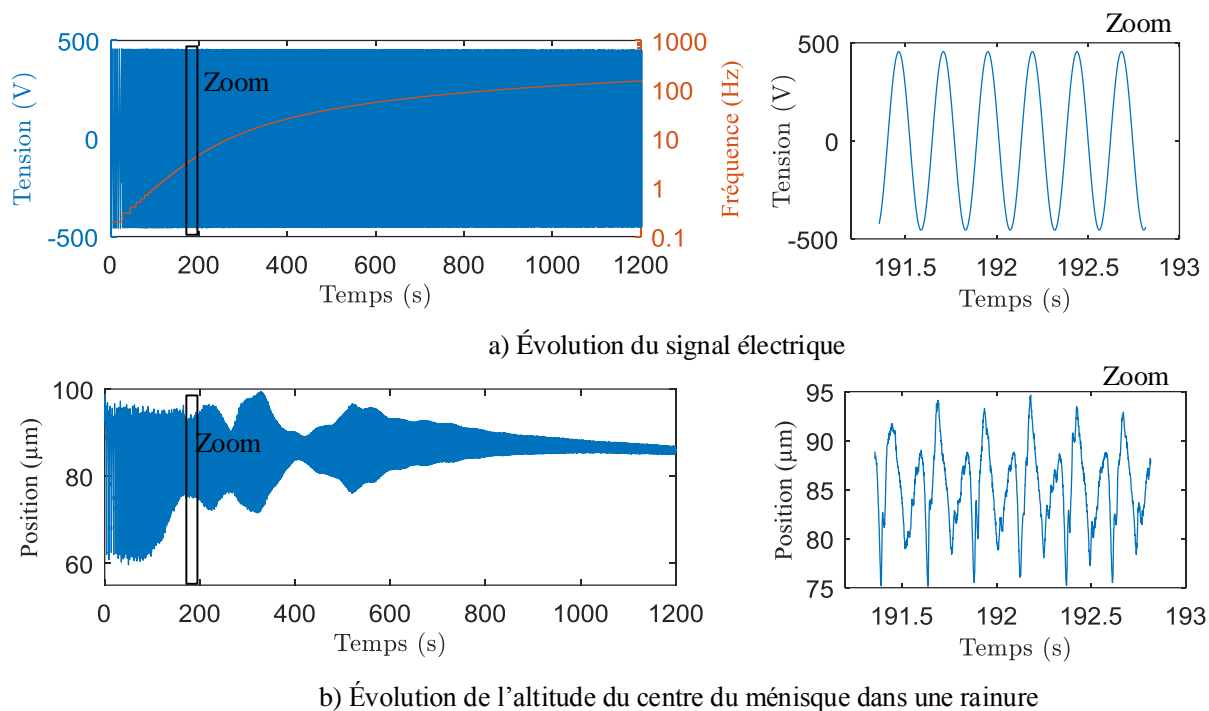


Figure 2. Signal électrique vobulé : actuation électrique et variation de la fréquence électrique (en haut), réponse mécanique de l'interface liquide (en bas).

Afin d'évaluer avec précision les fréquences de résonance de l'interface et l'énergie associée à ces fréquences, une transformée de Fourier est appliquée au signal mécanique sur des fenêtres temporelles correspondant à chaque incrément de la fréquence électrique. Cette fenêtre est choisie égale à $T(i) = n/f_e(i)$ avec n , le nombre de périodes du signal électrique pour l'incrément de fréquence associé et i la valeur de l'incrément. Après application de la méthode, un spectrogramme est obtenu (Figure 3) qui montre que le signal mécanique est composé de plusieurs fréquences énergétiques correspondant aux maximums locaux visibles à chaque pas de fréquence sur la transformée de Fourier. La Figure 3 présente ainsi le contenu spectral de chaque résonance mécanique en fonction de la fréquence d'actuation électrique. Chaque raie orangée correspond à une fréquence de résonance.

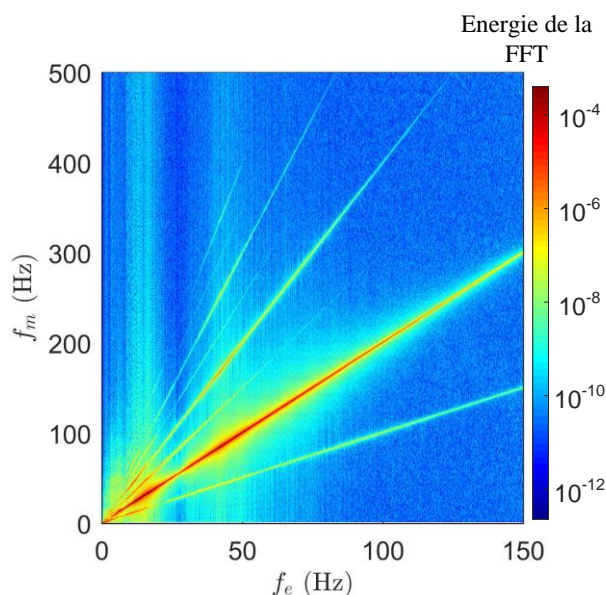


Figure 3. Energie de la transformée de Fourier (couleur) dans le plan des fréquences électriques et mécaniques.

La fréquence fondamentale, définie comme la fréquence mécanique la plus énergétique (ligne rouge sur la Figure 3) est évaluée à deux fois la fréquence du signal électrique car la déformation de l'interface est essentiellement pilotée par la contrainte normale électrique, laquelle est proportionnelle au carré de la tension électrique appliquée. La fréquence sous-harmonique ($f_m = f_e$) évolue à la même fréquence que la fréquence d'actuation électrique et est symptomatique de la présence de charges volumiques dans les phases liquide ou vapeur (la force de Coulomb est proportionnelle à la tension). Les autres fréquences harmoniques, moins énergétiques, évoluent en suivant des multiples entiers de la fréquence électrique et peuvent s'expliquer par des modes de résonance successifs pour le ménisque considéré. La largeur de la rainure conditionne ces modes de résonance à propriétés physicochimiques données (densité, tension de surface, ... etc).

3.2. Effet de la tension électrique sur les harmoniques

Afin d'obtenir plus ample information sur les fréquences harmoniques, plusieurs volutions successives réalisées dans les mêmes conditions, mais pour des valeurs de tension différentes ont été réalisées. Les spectres des harmoniques pour ces différentes valeurs de tension ont été étudiés de la même façon que décrit précédemment. La Figure 4 correspond à la compilation des spectres pour la sous-harmonique ($f_m = f_e$) obtenue par FFT et pour les différentes valeurs de tension. Ces courbes sont obtenues à l'aide d'une moyenne glissante appliquée sur l'énergie du signal. Une diminution de l'énergie du signal de la sous-harmonique peut être observée avec l'augmentation de la fréquence électrique. Deux minimums locaux sont aussi observés, l'un autour de 21,5 Hz, le second autour de 56 Hz. La position du premier minimum local, repéré à 21,5 Hz, correspond à la disparition de l'asymétrie du signal. Cette valeur correspond bien à la fréquence de relaxation électrique des charges, $1/t_e \sim 15$ Hz, pour du HFE-7100. En effet, si la période du signal électrique est plus importante que le temps de relaxation des charges, $t_e = \varepsilon/\sigma_e$, alors la densité volumique de charges électriques peut être négligée. L'ensemble des phénomènes observés pour la sous-harmonique, évoluant à $f_m = f_e$, confirme bien la présence de charges volumiques au sein du fluide dont l'effet devient négligeable à des fréquences supérieures à environ 20 Hz. La Figure 5 représente l'énergie de la fondamentale ($f_m = 2f_e$) en fonction de la fréquence mécanique pour différentes valeurs de tension. Les maximums locaux sont indiqués par des cercles sur chacune des courbes. La répartition de ces maximums, ainsi que l'énergie associée, apportent des indications sur les phénomènes de résonance.

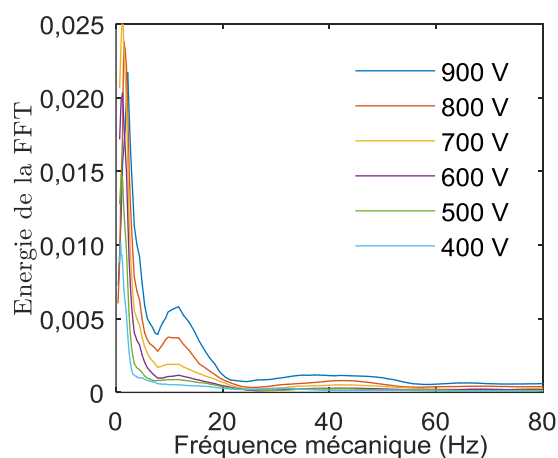


Figure 4. Energie de la sous-harmonique ($f_m = f_e$) pour différentes valeurs de tension.

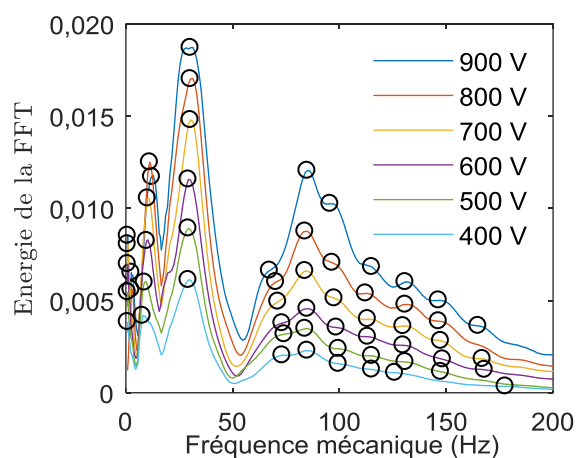


Figure 5. Energie de la fondamentale ($f_m = 2f_e$) pour différentes valeurs de tension.

Une fréquence de coupure est évaluée autour de 53 Hz : localement, l'amplitude du signal est très faible. Autour de cette fréquence de coupure, plusieurs maximums, assimilés à des fréquences de résonance, sont observés et ne dépendent pas de la valeur de la tension. Pour mieux comprendre l'origine de ces résonances, l'évolution de leur énergie respective en fonction de la tension est représentée sur la Figure 6. Une échelle logarithmique est choisie pour mettre en évidence la loi en puissance que suit l'énergie de chaque fréquence en fonction de la tension. La Figure 7 représente l'exposant associé à la loi puissance que suivent ces fréquences. Deux familles de fréquences se distinguent : une première évoluant selon une loi de puissance en $V^{1.4}$ ($f_m = [11; 30; 72]$ Hz), et une seconde évoluant selon une loi de puissance d'exposant compris entre 2 et 2,6 ($f_m = [85; 98; 115; 130; 148; 167]$ Hz). Ces différences peuvent également indiquer que le système fluide est piloté par deux phénomènes distincts. Une sélectivité de la fréquence en fonction des différentes échelles de longueur, aussi bien celle des rainures, que celle du réservoir liquide aux extrémités de la cavité, est suspectée. Une comparaison avec des modèles théoriques de vibration d'interface est nécessaire pour analyser plus finement ces résultats.

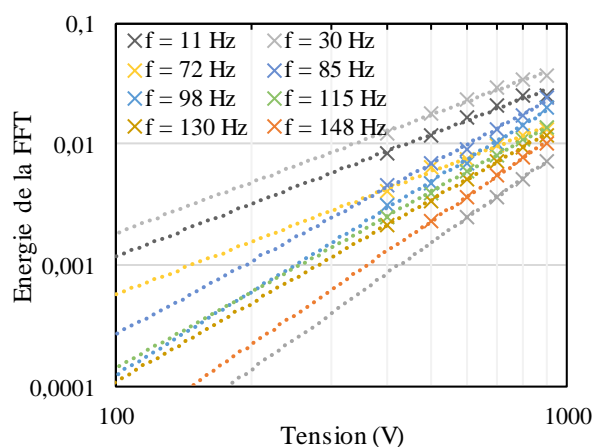


Figure 6. Effet de la tension sur l'énergie de la FFT associée à chaque fréquence de résonance.

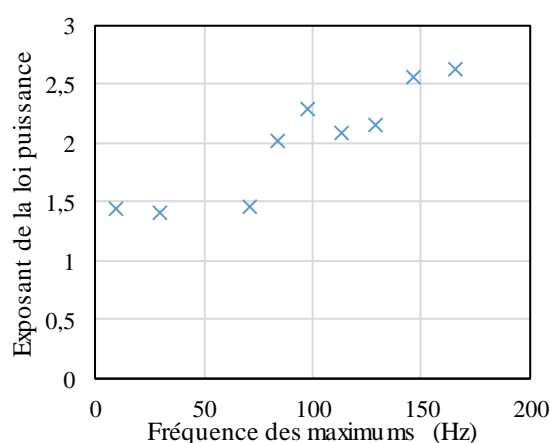


Figure 7. Variation de l'exposant de la loi puissance pour chaque fréquence de résonance.

Conclusions

La microscopie confocale chromatique permet l'acquisition temporelle et locale de la déformation d'une interface liquide-vapeur. En couplant cette mesure optique à une méthode de vibration fréquentielle, il est possible d'évaluer l'effet d'une actuation électrique sur un ménisque liquide-vapeur, en particulier sur les fréquences d'intérêt d'un système diphasique. Nos résultats expérimentaux mettent en évidence la présence d'un doublet de fréquences mécaniques sur la réponse mécanique en régime basses fréquences. La présence conjointe d'une fréquence sous-harmonique, mesurée égale à la fréquence d'actuation électrique, et d'une rupture de symétrie sur l'enveloppe de la déformée interfaciale, est reliée à la présence de charges électriques volumiques en deçà du régime de relaxation des charges électriques. Une fréquence fondamentale fortement énergétique et robuste est mise en évidence, qui correspond à l'actuation du ménisque par la contrainte normale diélectrique interfaciale. Des fréquences de résonance harmoniques de cette fondamentale sont également mises en évidence y compris lorsque la valeur de la tension appliquée est modifiée. L'actuation de modes résonants est suspectée, associée à la présence d'ondes stationnaires le long des ménisques dans les rainures.

La compréhension définitive de l'origine de ces fréquences de résonances pourrait permettre d'améliorer les transferts thermiques par changement de phase en faisant vibrer les interfaces liquide-vapeur dans des systèmes thermiques diphasiques tels que des caloducs rainurés.

Remerciements

La thèse de N. Cardin est supportée par le programme ARC énergie de la région Rhône-Alpes que les auteurs remercient au passage.

Références

- [1] J. R. Melcher, G. I. Taylor, “Electrohydrodynamics: A Review of the Role of Interfacial Shear Stresses,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 1(1), pp. 111–146, 1969.
- [2] S. Siedel, S. Cioulachtjian, A. J. Robinson, J. Bonjour, “Electric field effects during nucleate boiling from an artificial nucleation site,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 35(5), pp. 762–771, 2011.
- [3] J. S. Cotton, A. J. Robinson, M. Shoukri, J. S. Chang, “AC voltage induced electrohydrodynamic two-phase convective boiling heat transfer in horizontal annular channels,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 41, pp. 31–42, 2012.
- [4] Y. H. Diao, Y. Liu, J. Zhang, L. Guo, Y. H. Zhao, S. Wang, “Effect of electric field on the enhanced heat transfer characteristic of an evaporator with multilayered sintered copper mesh,” *Journal of Electrostatics*, vol. 73, pp. 26–32, 2015.
- [5] F. M. Mancio Reis, P. Lavieille, M. Miscevic, “Toward enhancement of water vapour condensation using wettability gradient surface,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 67, pp. 70–74, 2015.
- [6] X. Quan, M. Gao, P. Cheng, J. Li, “An experimental investigation of pool boiling heat transfer on smooth/rib surfaces under an electric field,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 85, pp. 595–608, 2015.
- [7] L. Davoust, Y. Fouillet, R. Malk, J. Theisen, “Coplanar electrowetting-induced stirring as a tool to manipulate biological samples in lubricated digital microfluidics. Impact of ambient phase on drop internal flow pattern,” *Biomicrofluidics*, vol. 7(4), 2013.
- [8] T. B. Jones, “Electrohydrodynamic heat pipes,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 16(5), pp. 1045–1048, 1973.
- [9] R. I. Loehrke, D. R. Sebitts, “Flat plate electrohydrodynamic heat pipe experiments,” 1975.
- [10] J. E. Bryan, J. Seyed-Yagoobi, “Heat transport enhancement of monogroove heat pipe with electrohydrodynamic pumping,” *J. Thermophysics & Heat Transfers*, vol. 11(3), pp. 454–460, 1997.
- [11] B. Suman, “A steady state model and maximum heat transport capacity of an electrohydrodynamically augmented micro-grooved heat pipe,” *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 49(21–22), pp. 3957–3967, 2006.
- [12] I. Saad, S. Maalej, M. C. Zaghoudi, “Modeling of the EHD effects on hydrodynamics and heat transfer within a fl at miniature heat pipe including axial capillary grooves,” *Journal of Electrostatics*, vol. 85, pp. 61–78, 2017.
- [13] N. Cardin, S. Lips, S. Siedel, L. Davoust, J. Bonjour, Theoretical and experimental investigations of the effect of an electric field on the performance of a grooved flat heat pipe, in: Joint 19th IHPC and 13th IHPS, Pisa, Italy, 2018.
- [14] A. Ramos, A. Castellanos, “Equilibrium shapes and bifurcation of captive dielectric drops subjected to electric fields,” *Journal of Electrostatics*, vol. 33(1), pp. 61–86, 1994.
- [15] A. Castellanos, *Electrohydrodynamics*, Springer, Vienna, 1998.