

# Extension des performances des systèmes diphasiques à pompage capillaire : utilisation des forces Électro-Hydro-Dynamique (EHD)

Baptiste BLAINEAU<sup>1\*</sup>, David DUFRAISSE<sup>1</sup>, Sébastien DUTOUR<sup>1</sup>, Thierry CALLEGARI<sup>1</sup>, Pascal LAVIEILLE<sup>1</sup>, Marc MISCEVIC<sup>1</sup>, Stéphane BLANCO<sup>1</sup>, Yves BERTIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Toulouse ; UPS, INP ; LAPLACE (Laboratoire Plasma et Conversion d'Énergie)  
118 route de Narbonne, F-31062 Toulouse, France.

<sup>2</sup> Université de Poitiers ; Institut Pprime UPR3346 CNRS - ENSMA  
1 avenue Clément Ader BP 40109 - 86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex

\*(auteur correspondant : blaineau@laplace.univ-tlse.fr)

**Résumé** - Deux expériences académiques sont mises en place pour mettre en évidence un actionnement d'un fluide au moyen des forces EHD : un module de pompe par conduction électrique qui utilise la force de Coulomb pour mettre en mouvement un liquide et un dispositif permettant d'appliquer la force diélectrophorétique sur une interface liquide-vapeur. Les résultats obtenus mettent en évidence le potentiel des effets EHD pour le contrôle et l'extension des performances des systèmes diphasiques à pompage capillaire.

## Nomenclature

$f_{KH}$	Densité volumique de force électrique, N/m <sup>3</sup>	$\varepsilon_r$	Permittivité relative
$E$	Champ électrique, V/m	$\rho$	Masse volumique, kg/m <sup>3</sup>
$D$	Distance inter-électrode, m	$\Omega$	Élément de volume, m <sup>3</sup>
$V$	Différence de potentiel entre les électrodes, V	<i>Indices et exposants</i>	
$P$	Pression, Pa	<i>liq</i>	Liquide
$f_S$	Densité surfacique de force électrique, N/m <sup>2</sup>	<i>vap</i>	Vapeur
$h$	Hauteur de liquide entre les électrodes, m	<i>air</i>	Air
$g$	Accélération de la pesanteur, m/s <sup>2</sup>	$n$	Composante normale
<i>Symboles grecs</i>		$t$	Composante tangentielle
$\rho_E$	Densité volumique de charge, C/m <sup>3</sup>		
$\varepsilon$	Permittivité, F/m		

## 1. Introduction

Dans le contexte de refroidissement des composants électroniques, les systèmes diphasiques à pompage capillaire sont couramment utilisés. Ces systèmes sont basés sur le changement d'état liquide-vapeur ce qui en fait des systèmes performants et autonomes grâce au pompage capillaire à l'interface d'évaporation. Cependant, la différence de pression motrice générée par la structure capillaire est limitée par le rayon de courbure minimum que peut atteindre l'interface dans les pores ou les rainures. Et c'est cette différence de pression qui en retour détermine le flux maximal qui peut être évacué par le système sur une longueur de transport donnée (limite capillaire). Ainsi pour étendre les performances de ces systèmes, il est envisagé de les hybrider avec des systèmes apportant un contrôle actif sur l'écoulement ou au niveau de l'interface.

Une de ces approches, la voie EHD, utilise des champs électriques pour agir sur le fluide. Cette méthode est très intéressante, notamment pour les applications spatiales, car elle présente

l'avantage de ne nécessiter aucune pièce mécanique en mouvement ce qui limite le risque de panne.

Afin de mieux comprendre et quantifier les effets de la force EHD et d'explorer le potentiel des fluides caloporteurs utilisés dans les systèmes diphasiques, deux expériences sont présentées. Dans un premier temps, on s'intéresse à un module de pompage EHD du liquide par conduction électrique. Puis, on regardera les effets électriques à l'interface liquide-vapeur. L'objectif est de déterminer la différence de pression que l'on peut générer dans le liquide en fonction du champ électrique. Signalons que ce travail correspond aux résultats préliminaires d'une étude plus générale envisagée dans le cadre du projet ANR EDYPHICE où des expériences avec flux de chaleur et gradient de température sont prévues.

## 2. Présentation des forces Électro-Hydro-Dynamiques

La densité volumique de force qui s'applique sur un liquide diélectrique en présence d'un champ électrique est donnée par le modèle de Korteweg-Helmholtz [1] :

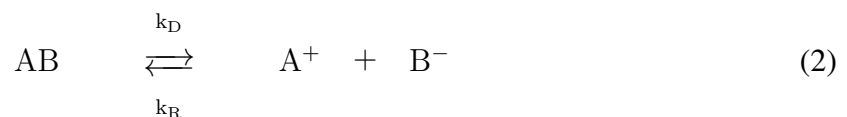
$$\mathbf{f}_{KH} = \rho_E \mathbf{E} - \frac{1}{2} E^2 \mathbf{grad} \varepsilon + \frac{1}{2} \mathbf{grad} \left( \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} E^2 \right) \quad (1)$$

où,  $\rho_E$  est la densité volumique de charge dans le fluide,  $\mathbf{E}$  le champ électrique,  $\varepsilon$  la permittivité du milieu et  $\rho$  la masse volumique du liquide.

Le premier terme est la force de Coulomb, il est associé aux charges libres. Les deux autres termes sont associés aux effets de polarisation du milieu et sont respectivement le terme de force diélectrophorétique et d'électrostriction.

### 2.1. Mécanisme de génération des charges dans un liquide diélectrique

La force de Coulomb agit sur les charges libres. Sous l'effet du champ, les charges se déplacent et entraînent avec elles les molécules de liquide, transmettant ainsi l'intégralité de cette force au fluide. Les charges peuvent avoir différentes origines. Pour les liquides conducteurs, des espèces ioniques sont naturellement présentes et subissent l'effet du champ. Pour les liquides diélectriques, Atten et al. [2] a montré qu'au-delà d'un certain champ électrique ( $10^6$  V/m), il est possible de générer des charges dans le liquide par dissociation des espèces (2).



Les ions ainsi créés se comportent comme des charges libres et vont augmenter le courant (figure 1).

Lorsque l'on augmente encore la différence de potentiel entre les électrodes et que l'on atteint un champ de l'ordre de  $10^8$  V/m, on observe alors un deuxième régime appelé régime d'injection. Le mécanisme de génération des charges change, les molécules neutres sont transformées directement en ions positifs (3) au niveau de l'électrode de haut potentiel (réaction de réduction).

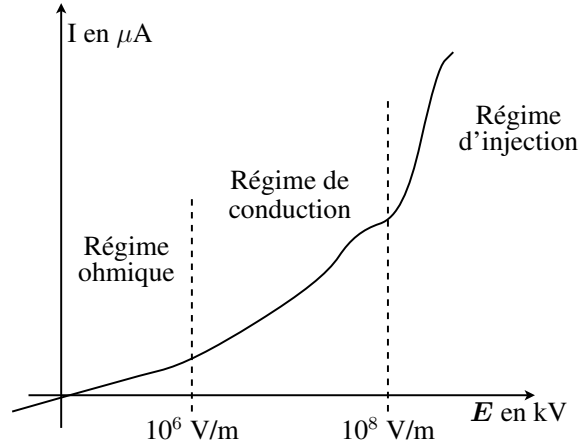
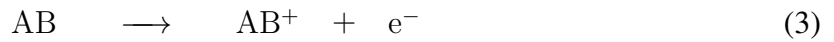


Figure 1 Courbe de tendance de la caractéristique courant-tension d'un couple d'électrodes dans un liquide diélectrique



Le passage du régime de conduction électrique au régime d'injection s'observe par une nouvelle augmentation du courant (figure 1).

## 2.2. Forces de polarisation sur une interface liquide-vapeur

Ces forces sont liées à la variation de permittivité du milieu due aux variations de la température et de la masse volumique. Lorsque l'on est dans un milieu diphasique, elle s'applique principalement à l'interface entre le liquide et la vapeur où le gradient de permittivité est très important. Si l'on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de charge libre dans le milieu, les seules forces qui s'appliquent sur le fluide sont les forces de polarisation à l'interface. En intégrant la densité volumique de force (1) sur un volume englobant une surface élémentaire de l'interface [1], on obtient une densité surfacique de force normale à l'interface (4), en fonction des propriétés de chacune des phases :

$$\mathbf{f}_S = \frac{1}{2} \left[ \frac{\varepsilon_{liq} - \varepsilon_{vap}}{\varepsilon_{vap}} (\varepsilon_{liq} E_{n,liq}^2 + \varepsilon_{vap} E_{t,liq}^2) - \left( E_{liq}^2 \rho_{liq} \frac{\partial \varepsilon_{liq}}{\partial \rho_{liq}} - E_{vap}^2 \rho_{vap} \frac{\partial \varepsilon_{vap}}{\partial \rho_{vap}} \right) \right] \mathbf{n} \quad (4)$$

On retrouve dans cette expression deux termes : la première contribution correspond à la force diélectrophorétique, elle est liée à la différence de permittivité de chacune des phases ; le deuxième terme est la force d'électrostriction qui sera nulle si le fluide est isotherme.

## 2.3. Avantages et inconvénients des différents effets EHD

La force de Coulomb est mise en oeuvre dans une optique de pompage d'un liquide par conduction électrique ou injection ([3], [4]). Pour qu'une force nette apparaisse dans le liquide, il faut que le champ électrique soit dissymétrique, donc que les électrodes soient dissymétriques. Si le régime d'injection a le plus fort potentiel d'actionnement du liquide, des études [3] ont

montré aussi que les propriétés du fluide et des électrodes pouvaient être fortement dégradées, ce qui affecte la répétabilité des expériences. Ainsi, il est préférable de rester dans le régime de conduction électrique où les espèces dissociées persistent en quantité extrêmement faible. Feng et al. [4] a créé ainsi un module de pompage à l'aide de deux électrodes asymétriques et a réussi à générer une différence de pression de 320 Pa avec du R-123 pour un champ de 3,5 kV/mm. La différence de pression générée dépend fortement de la géométrie des électrodes. Ici le couple utilisé est constitué d'une électrode annulaire pour la masse et d'une grille pour l'électrode de haut potentiel. Il s'agit du couple d'électrodes qui présente les meilleures performances [5].

Les forces de polarisation n'impliquent pas quant à elles de changement dans la nature chimique du fluide. D'autre part Jones [6] a montré que contrairement aux forces de Coulomb, il est possible d'appliquer la force diélectrophorétique en utilisant des électrodes protégées par une couche de diélectrique solide et une tension alternative. Ceci permet d'envisager d'une part, un actionnement EHD pour des fluides conducteurs ou sujet à de l'électrolyse et d'autre part, un contrôle de la force par la fréquence plutôt que par le potentiel. Ainsi pour de l'eau déionisée, lorsque l'interface est placée dans un champ de 0,25 kV/mm à une fréquence de 10 kHz, Jones génère une différence de pression de 58 Pa entre le liquide et l'air soit une hauteur d'eau de 6 mm.

### 3. Pompage EHD d'un liquide

#### 3.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental est constitué d'un module de pompe EHD et d'un banc de caractérisation fluide. Le module de pompage (figure 2) est constitué d'un couple d'électrodes, une grille (0,5 mm d'épaisseur et comportant treize trous circulaires d'un diamètre d'1 mm répartis en étoile) pour l'électrode de haut potentiel et un anneau (3 mm d'épaisseur) pour la masse (voir figure 3). La distance inter-électrodes est de 2,5 mm, le diamètre de conduite est de 10 mm. Le support en téflon et les électrodes sont coulés dans une résine qui permet d'assurer l'isolation électrique et l'étanchéité fluide. Le tout est placé dans une coque métallique pour imposer une masse sur la surface externe du module (figure 4).

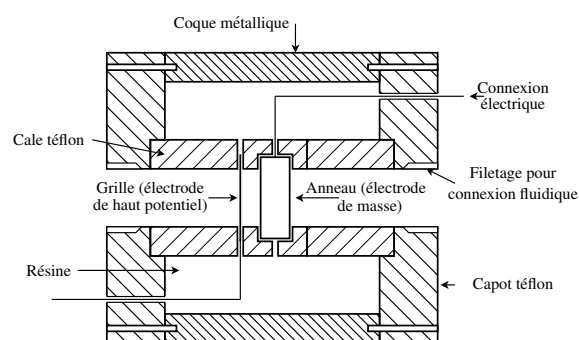


Figure 2 *Vue en coupe du module de pompe*

La différence de pression aux bornes de la pompe est mesurée au moyen d'un capteur de pression différentielle. D'autre part, le courant et la différence de potentiel sont mesurés.



Figure 3 Support d'un couple d'électrodes, anneau : électrode de masse, grille : électrode de haut potentiel

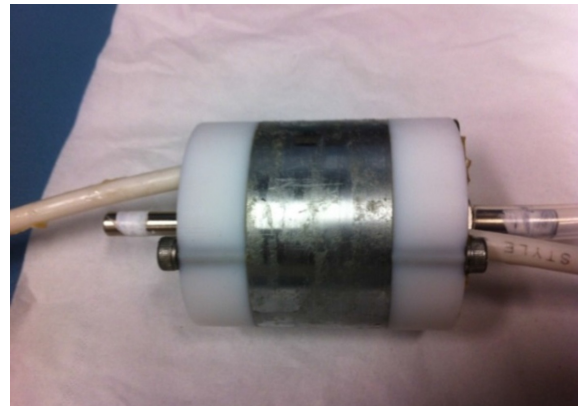


Figure 4 Module de pompe EHD, seul le blindage métallique et les connexions (fluidique et électrique) sont visibles

### 3.2. Résultats expérimentaux et comparaisons avec la littérature

Le R-123 étant un fluide frigorigère néfaste pour l'environnement, le choix du fluide de travail s'est orienté vers les HFE moins nocifs. Le premier essai est un test en statique pour pouvoir déterminer la différence de pression qu'un couple d'électrodes peut générer.

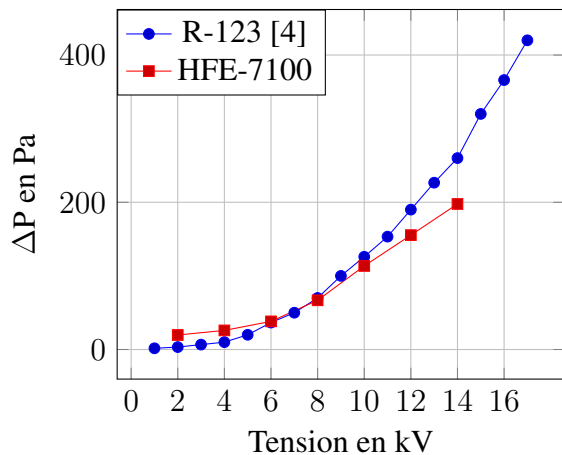


Figure 5 Comparaison de la différence de pression générée pour différents fluides en fonction de la tension

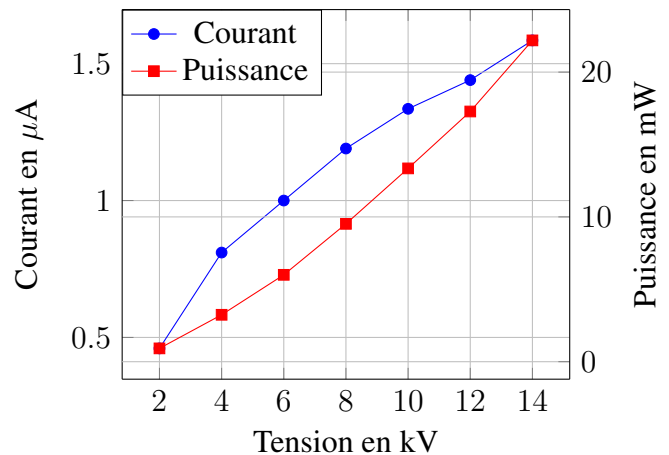


Figure 6 Évolution du courant et de la puissance consommée en fonction de la tension, pour du HFE-7100

La figure 5 présente l'évolution de la différence de pression générée par le module de pompe en fonction de la tension. Les résultats montrent que la différence de pression obtenue varie avec le carré de la tension appliquée aux bornes des électrodes (figure 5). Les résultats sont comparables avec ceux obtenus par Feng et al. [4] en utilisant du R-123.

La figure 6 présente l'évolution du courant et de la puissance consommée en fonction de la tension. Il est intéressant de noter que le courant qui circule dans le module de pompe reste très faible, de l'ordre du  $\mu\text{A}$ , et donc que la puissance consommée est de l'ordre de la dizaine de mW.

Ces résultats mettent en évidence que la force de Coulomb peut effectivement être utilisée pour générer le pompage d'un liquide, l'obtention de différence de pression plus importante n'étant liée qu'au nombre de couples d'électrodes en série.

## 4. Force diélectrophorétique à une interface liquide-vapeur

### 4.1. Dispositif expérimental

Afin de comprendre et de quantifier l'effet de la force diélectrophorétique sur une interface liquide-vapeur, une expérience académique analogue à celle de Pellat [7] a été réalisée. Il s'agit de placer en regard deux électrodes, puis de plonger la base de l'ensemble dans un liquide et d'appliquer une tension continue aux bornes de la cellule. Les électrodes sont constituées d'un dépôt d'aluminium sur un support en silicium (figure 7 et 8). L'espacement entre les électrodes est de 2 mm, soit une distance supérieure à la longueur capillaire du fluide considéré (pour le HFE-7100  $L_c=0,95$  mm). Les électrodes font 10 mm de large, on peut donc faire l'hypothèse que le champ est homogène entre les électrodes.

Ce dispositif va permettre d'étudier l'effet d'un champ électrique sur une interface liquide-air en fonction de la différence de potentiel appliquée. La tension de claquage de l'air est de l'ordre de 3 kV/mm, donc la différence de potentiel maximale envisageable est d'environ 6 kV.

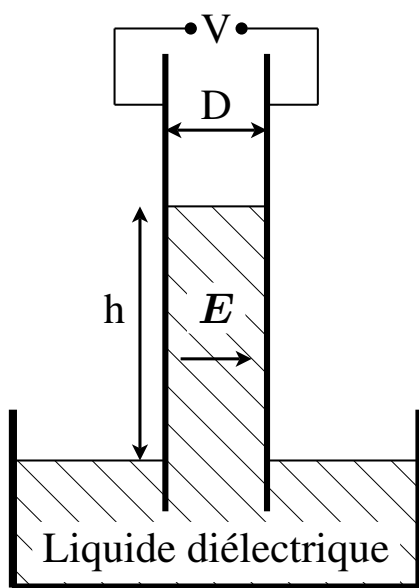


Figure 7 Schéma du dispositif expérimental

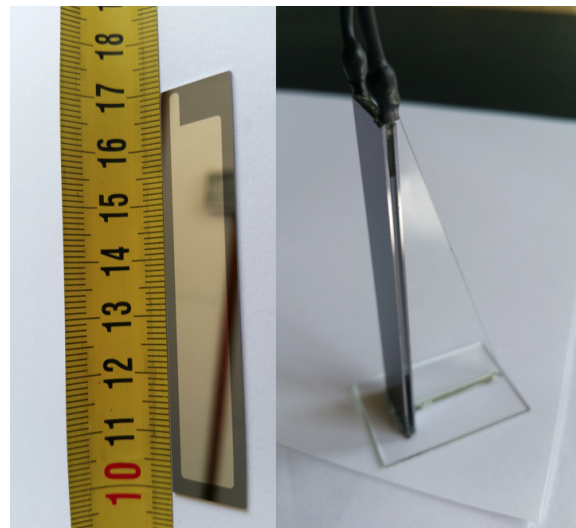


Figure 8 À gauche, une électrode ; à droite, le couple d'électrodes assemblé

### 4.2. Résultats expérimentaux

La figure 9 présente l'évolution de la hauteur du liquide entre les électrodes en fonction de la tension. On obtient une hauteur de 7 mm correspondant à une différence de pression de 100 Pa pour une tension de 4 kV.

Jones [6] a montré que dans les conditions particulières de l'expérience et en faisant l'hypothèse d'absence de charges libres, la hauteur du liquide entre les électrodes par rapport au niveau du réservoir est donnée par (5) :

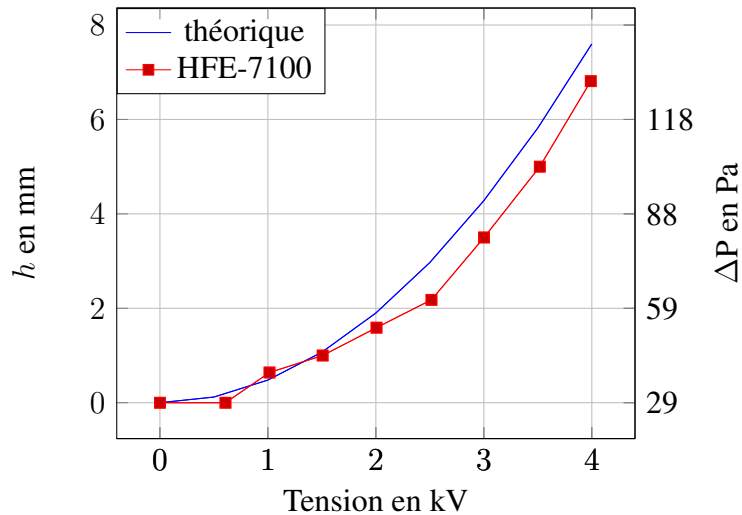


Figure 9 Hauteur du liquide entre les électrodes et différence de pression générée en fonction du champ électrique

$$h \approx \frac{(\varepsilon_{liq} - \varepsilon_{air}) V^2}{2\rho g D^2} \quad (5)$$

où,  $\varepsilon$  est la permittivité respectivement du liquide et de l'air,  $V$  la différence de potentiel entre les électrodes,  $\rho$  la masse volumique du liquide,  $g$  l'accélération de la pesanteur et  $D$  la distance inter-électrode.

Le modèle est en bon accord avec les résultats expérimentaux, pour du HFE-7100 de permittivité relative  $\varepsilon_r = 7,4$  et de masse volumique  $\rho = 1510 \text{ kg/m}^3$ . Cependant, il y a probablement des effets de charges qui viennent se superposer aux forces et modifier la forme de l'interface. En effet, on a pu observer à forte tension une dissymétrie de l'interface liquide air (figure 10). Il n'est pas interdit que les effets de charges puissent aboutir à des écarts significatifs entre le modèle et l'expérience, au delà des 4 kV.

La correspondance en pression est donnée par la figure 9, à l'aide de la formule :  $\Delta p = \rho g h$

## 5. Conclusion

Ces premières expériences ont permis de mettre en évidence les différentes applications de la force EHD qui pourraient être utilisées pour étendre les performances des systèmes à pompage capillaire (boucles diphasiques et caloducs).

Sur la phase liquide, le pompage EHD offre des performances intéressantes, d'autant plus que le faible encombrement des électrodes permet d'envisager l'utilisation de N couples en série pour obtenir des différences de pression plus importantes. Il est prévu de regarder l'influence des différents paramètres (distance inter-électrodes, géométrie, température du fluide, propriété du fluide...) à l'aide d'un prototype modulaire avec trois couples d'électrodes.

La force diélectrophorétique présente l'intérêt d'agir directement sur l'interface et de ne pas modifier la composition chimique du fluide. Elle présente un potentiel de pompage de film li-

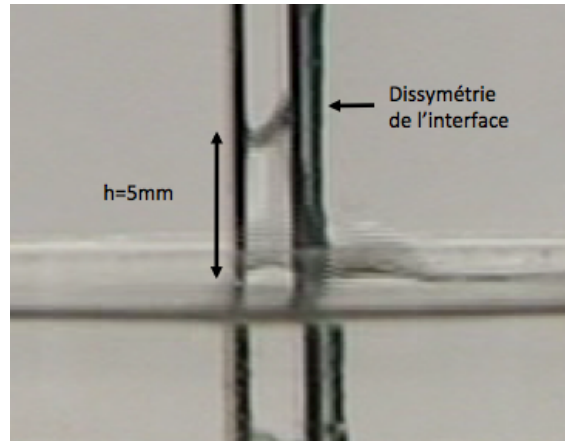


Figure 10 Interface dissymétrique HFE-7000 / air entre deux électrodes ( $D = 2 \text{ mm}$  et  $V = 3,5 \text{ kV}$ ), la hauteur de liquide est de 5 mm

guide très localisé (ce qui la rend très adaptée aux configurations des caloducs). Par exemple, elle pourrait être utilisée pour intensifier le transfert de chaleur ou réduire les instabilités dans le condenseur d'une boucle capillaire. En terme de perspective, il est prévu de refaire cette expérience dans une enceinte confinée pour contrôler les conditions de température et de pression (fluide pur) et d'étudier l'effet du changement d'état lorsqu'un flux de chaleur est appliqué sur les parois.

### Références

- [1] Hermann A. Haus, James R. Melcher, *Electromagnetic Fields and Energy*, Massachusetts Institute of Technology : MIT OpenCourseWare (2015).
- [2] Pierre Attend, M. Heidara, Electrical Conduction and EHD Motion of Dielectric Liquids in a Knife-Place Electrode Assembly, *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, (1985) 187-198.
- [3] Jeff Darabi, Haixia Wang, Development of an Electrohydrodynamic Injection Micropump and Its Potential Application in Pumping Fluids in Cryogenic Cooling Systems, *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, (2005) 747-755.
- [4] Yinshan Feng, Jamal Seyed Yagoobi, Understanding of electrohydrodynamic conduction pumping phenomenon, *Physics of Fluids*, (2004) 2432-2441.
- [5] Seong-Il Jeong, Jamal Seyed Yagoobi, Experimental study of electrohydrodynamic pumping through conductino phenomenon, *Journal of Electrostatics*, (2002) 123-133.
- [6] Thomas B. Jones, Frequency-Dependent Electromechanics of Aqueous Liquids : Electrowetting and Dielectrophoresis, *Langmuir*, (2004) 2813-2818.
- [7] Henri Pellat, Mesure de la force agissant sur les diélectriques liquides non électrisés placés dans un champ électrique, *C. R. de l'Académie des Sciences de Paris*, (1895) 691-694.

### Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR pour le support financier dans le cadre du projet EDYPHICE.